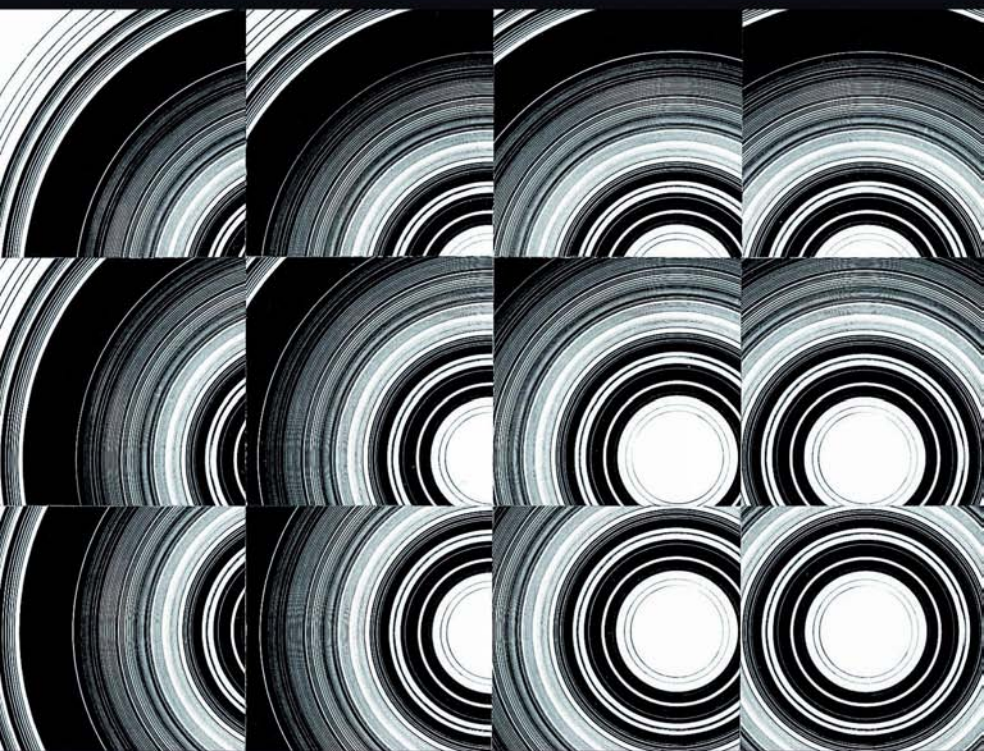


Albert Einstein e Leopold Infeld

# L'EVOLUZIONE DELLA FISICA

Sviluppo delle idee dai concetti iniziali alla relatività e ai quanti



Universale Bollati Boringhieri







Albert Einstein e Leopold Infeld

## L'evoluzione della fisica

Sviluppo delle idee dai concetti iniziali  
alla relatività e ai quanti

Prefazione di Carlo Castagnoli

Bollati Boringhieri

Prima edizione nella collana «Universale Bollati Boringhieri» 1965

*Ristampa luglio 2007*

© 1965, 2007 Bollati Boringhieri editore s.r.l., Torino, corso Vittorio Emanuele II, 86  
I diritti di memorizzazione elettronica, di riproduzione e di adattamento totale o parziale con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm e le copie fotostatiche) sono riservati

Stampato in Italia dalla Litografia «Il Mettifoglio» di Venaria Reale (To)

ISBN 978-88-339-8042-3

Titolo originale *The Evolution of Physics*

*The Growth of Ideas from Early Concepts to Relativity and Quanta*

Simon & Schuster, New York 1938

Traduzione di Adele Graziadei

Progetto grafico della collana di Enzo Mari

**[www.bollatiboringhieri.it](http://www.bollatiboringhieri.it)**

Quest'opera è protetta dalla Legge sul diritto d'autore.  
È vietata ogni duplicazione, anche parziale, non autorizzata.

## Indice

- 7 *Prefazione di Carlo Castagnoli*
- 13 *Prefazione degli autori*
- 15 *Parte prima* L'ascesa dell'interpretazione meccanicistica  
Il romanzo giallo perfetto, 17 Il primo indizio, 19 Vettori, 25 L'enigma del moto, 31 Un indizio negletto, 43 Il calore è una sostanza?, 47 Le montagne russe, 53 Il tasso di scambio dell'energia, 57 Lo sfondo filosofico, 61 La teoria cinetica della materia, 65 *Riassumiamo*, 71
- 73 *Parte seconda* Decadenza dell'interpretazione meccanicistica  
I due fluidi elettrici, 75 I fluidi magnetici, 84 La prima grave difficoltà, 88 La velocità della luce, 94 La luce come sostanza, 97 L'enigma del colore, 101 Che cos'è un'onda?, 104 La teoria ondulatoria della luce, 109 Le onde luminose sono longitudinali o trasversali?, 117 L'etere e l'interpretazione meccanicistica, 120 *Riassumiamo*, 122
- 123 *Parte terza* Campo, relatività  
Campo come rappresentazione, 125 I due pilastri della teoria del campo, 136 Realtà del campo, 141 Campo ed etere, 147 Il sistema di riferimento, 150 Etere e moto, 159 Tempo, distanza, relatività, 170 Relatività e meccanica, 183 Il continuo spazio-temporale, 189 La relatività generale, 198 Fuori e dentro l'ascensore, 203 Geometria ed esperienza, 211 La relatività generale e la sua verifica, 221 Campo e materia, 226 *Riassumiamo*, 229

231 *Parte quarta* Quanti

Continuità, discontinuità, 233 Quanti elementari di materia ed elettricità, 235 Quanti di luce, 241 Spettri luminosi, 247 Le onde della materia, 252 Onde di probabilità, 259 Fisica e realtà, 270 *Riassumiamo*, 273

275 *Indice dei nomi*

277 *Indice delle cose*



## *Prefazione*

Carlo Castagnoli

*L'evoluzione della fisica* è stato pubblicato nel 1938, ma conserverà la sua freschezza e la sua attualità per molti anni ancora: cosa che non accade di norma per i testi di informazione scientifica. Il fatto è che Einstein e Infeld non hanno voluto aumentare il bagaglio di cognizioni del lettore o provvedere a un aggiornamento delle sue nozioni, ma si son posti un obiettivo molto più impegnativo: quello di dare delle idee e illustrare il processo storico della loro formazione. Proprio perché l'obiettivo ultimo della fisica è di riportare a poche idee fondamentali l'estrema varietà dei risultati che si conseguono nella sperimentazione sui processi fisici naturali, l'evoluzione di tali idee fondamentali è lenta e faticosa. Si richiede un lungo periodo di tempo per l'accumulazione di dati sperimentali, per la loro critica, per l'elaborazione delle prove cruciali, e infine per la maturazione dei presupposti critici e teorici che portano ai nuovi livelli di conoscenza.

Negli anni intercorsi dall'uscita del libro questo processo preparatorio ha avuto un formidabile sviluppo quantitativo, ma non si è arrivati a svolte qualitative.

Einstein diceva che nessuno scienziato pensa con formule: quindi le idee fondamentali della fisica si possono esprimere con parole. Questo libro è una magnifica e ormai celebre dimostrazione di ciò. Esso mostra com'è possibile creare un linguaggio che permetta la comunicazione tra gli scienziati (e i tecnici) e gli «uomini di cultura» nel senso tradizionale.

La decodificazione dei risultati scientifici (per lo meno quando essi raggiungano il livello dei concetti fondamentali) è un'operazione tanto difficile, quanto è doverosa. Quando il simbolo usato dal

fisico deve essere ritradotto in un'analisi e definizione in termini dei simboli abituali, cioè in termini di parole, solo una profonda padronanza di esso permette di non errare. È per questo che fra i più grandi espositori si annoverano scienziati eccelsi: basti ricordare Galileo, Darwin, e lo stesso Einstein.

Einstein e Infeld hanno scritto un testo *popolare* non solo sotto questo profilo tecnico del linguaggio, che pure rappresenta uno dei problemi di fondo della cultura moderna.

Questo è un libro popolare anche proprio perché gli autori non presuppongono nel lettore «particolari conoscenze ma piuttosto un alto livello intellettuale». Infatti esso richiede una passione per le idee fondamentali della fisica e della filosofia, la capacità di vivere dall'interno il senso di dramma che si accompagna alle storiche svolte della fisica. Le idee si scontrano, si modificano, si selezionano fino a che tutti i fatti, anche il più piccolo, restano inquadrati.

Già dalle prime pagine ci si rende conto di ciò. Quanti di noi hanno stentato a capire come mai solo nel Seicento si è arrivati a stabilire le equazioni fondamentali del moto! Quale è la ragione profonda per cui l'uomo – che pure da tre millenni sapeva predire le eclissi, che da due millenni sapeva misurare il raggio della Terra, che aveva costruito una perfetta geometria – si era arrestato di fronte al problema del moto?

È chiaro che se non si riesce a far sentire ciò il divorzio tra la fisica e l'uomo di cultura *umanistica* inizia fin dal primo incontro, fin dai banchi del liceo, quando si sentono enunciare (magari nel latino di Newton) le leggi della meccanica.

Ma a chi legga i primi capitoli de *L'evoluzione della fisica*, questo rischio di divorzio risulterà molto ridotto dall'andamento drammatico che gli autori hanno saputo mettere in luce nel processo di formazione delle idee.

Da questo dramma delle idee (che poi è spesso il dramma di una concezione del mondo) esce anche un'esemplare lezione di modestia. Quanto sembra acquisito e certo – un semplice, minuscolo, ma irriducibile fatto basta ad annullarlo. Gigantesche costruzioni del pensiero, piene di genialità o di perseveranza, cadono di fronte a un'osservazione fatta con un rozzo cannocchiale o a un'elaborata tecnica come quella di Michelson e Morley. Per cui vengono spontanee alla mente le dure parole del galileiano Salviati nei confronti

di coloro che hanno «cervelli atti più alla loquacità ed ostentazione che alla specolazione ed investigazione dell'opere più segrete di natura; li quali prima che ridursi a profferir quella savia, ingenua e modesta parola, "non lo so", scorrono a lasciarsi uscir di bocca ed anco dalla penna qual si voglia grande esorbitanza».

Chi si pone il problema del valore educativo dell'insegnamento scientifico (ancor oggi dubitando della sua capacità di formazione di un uomo *moderno*) non dovrebbe ignorare quest'aspetto morale. Einstein ce lo ricorda continuamente in questo libro: il coraggio e la modestia fanno parte dell'abito mentale del ricercatore. E risulta inoltre che per l'evoluzione della fisica occorrono menti geniali sì, ma anche libere. Libere da pregiudizi, da paure, da principi di autorità; Einstein soleva dire che i professori gli ricordavano i caporali e i sottotenenti.

L'evoluzione delle idee nella fisica è ben lontana dall'essere rallentata o tanto meno compiuta. Nel quadro generale del travolgente progresso tecnico e scientifico la fisica mantiene ancora una sua autorevole *leadership*. Siamo però forse in un momento nuovo, con caratteristiche particolari e nuove. Le conquiste sperimentali si accumulano con un ritmo sempre crescente che non ha precedenti storici, le tecniche si sviluppano con un'estrema rapidità, la dimensione degli esperimenti diventa sempre più grande. Limitiamoci al solo campo delle particelle elementari o della struttura della materia: quanti risultati, dall'epoca in cui fu scritto questo libro! Si sono scoperte intere famiglie di particelle: mesoni, leptoni, iperoni; si sono trovate le antiparticelle, le risonanze. Si è visto che in alcuni casi non valgono fondamentali proprietà di simmetria, si è scoperta la fissione del nucleo, si è indagato sulla sua struttura. La conoscenza della struttura della materia nei suoi vari stati di organizzazione ha avuto sviluppi estremamente rapidi. Si sono utilizzate in bene e in male alcune di queste scoperte, si sono sviluppate tecniche elaboratissime nel campo degli acceleratori di particelle, dei plasmi, dei rivelatori.

Ora, a questa straordinaria fecondità dei risultati sperimentali sembra corrispondere una minore incisività dei risultati interpretativi. Siamo forse in una situazione che può ricordare (con tutte le cautele che tali richiami comportano) i primi anni del Novecento,

quando la grande quantità di dati raccolti dagli spettroscopisti attendeva l'illuminata sistemazione di Planck, di Bohr e di Rutherford.

Parlando di questa fisica, Einstein e Infeld scrivono che «pur troppo manchiamo tutt'ora di una teoria basata su idee fondamentalmente semplici la quale interpreti la gran messe di fatti della fisica nucleare».

La situazione non è sostanzialmente cambiata negli ultimi trent'anni e quest'affermazione è ancora vera. Dal punto di vista delle idee fondamentali si è nell'attesa di un nuovo salto evolutivo che ci permetta una maggiore unità del nostro sapere.

Uno dei problemi fondamentali che la fisica ha oggi da risolvere è legato al fatto che le particelle elementari della materia sono soggette a quattro tipi di interazioni fondamentali: le interazioni forti, elettromagnetiche, deboli e gravitazionali.

Le *interazioni forti* si hanno tra nucleoni e iperoni. Esse sono caratterizzate dalle leggi di conservazione: *a)* della carica; *b)* del numero barionico; *c)* dell'energia e della quantità di moto (simmetria traslazionale dello spazio-tempo); *d)* dello *spin* (simmetria rotazionale dello spazio-tempo); *e)* dello spin isotopico (simmetria rotazionale dello spazio isotopico); *f)* della simmetria tra particelle e antiparticelle.

Le *interazioni elettromagnetiche*, di media intensità, tra particelle cariche sono ben note. A queste interazioni si deve ad esempio anche il decadimento del pione neutro, con vita media di circa  $10^{-17}$  secondi. Delle precedenti leggi di conservazione non vale quella dello spin isotopico.

Le *interazioni deboli* causano il decadimento spontaneo di tutte le particelle, eccettuati protone, elettrone, neutrino e il fotone. Valgono le leggi di conservazione delle interazioni elettromagnetiche.

Questi tre tipi di interazione hanno intensità che stanno tra loro nel rapporto  $1 : 10^{-2} : 10^{-12}$ .

Le *forze gravitazionali* sono molto più deboli di quelle qui considerate, avendo intensità (nelle unità qui usate) di circa  $10^{-34}$ .

La possibile esistenza di nuove particelle dipende naturalmente anche dalla possibile esistenza di altre interazioni oltre quelle menzionate. Se ne esistono altre, devono esservi anche intere classi di nuove particelle.

Quali siano le profonde relazioni che intercorrono tra questi quattro tipi di interazioni, e la possibilità dell'esistenza di una più nascosta unità sottostante a esse, costituiscono forse il più affascinante problema della fisica d'oggi. Ci dobbiamo augurare che tra qualche anno un nuovo Einstein e un nuovo Infeld possano scrivere un altro libro su questa ulteriore tappa dell'evoluzione della fisica.

Un secondo aspetto di particolare importanza che caratterizza l'attuale stadio di evoluzione della fisica è la continua estensione dei suoi metodi e dei suoi strumenti alle discipline di confine. Ci basti ricordare che dal punto di vista conoscitivo la fisica ha dato recentemente un enorme apporto alla cosmologia, cioè al problema della natura dell'universo nel suo complesso, e alla cosmogonia, cioè al problema della storia e dell'origine dell'universo stesso: i programmi in questo campo sono entusiasmanti. D'altro canto la fisica applicata alla biologia aggredisce con un impeto promettente il problema più antico dell'uomo: quello della materia vivente. Penso che parlando dell'evoluzione della fisica oggi si debba sottolineare come dal suo vecchio tronco si dipartono oggi questi rami nuovi e fiorenti.

Diventerà sempre più difficile seguire gli sviluppi delle varie discipline che alla fisica si richiamano, e quindi sempre più importante trovare ogni tanto chi si sobbarchi il difficile compito di sintetizzare le questioni di fondo e chi tali sintesi sappia decodificare dal linguaggio tecnico per farne elemento di cultura per i non specialisti: è da questi campi interdisciplinari, oltre che dalla fisica stessa, che bisogna attendersi il maggior progresso nella nostra conoscenza del mondo esterno.

CARLO CASTAGNOLI



## *Prefazione degli autori*

Prima di cominciare a leggerci tu esigi, a buon diritto, risposta a un paio di domande: Con quale intento è stato scritto questo libro? A quale categoria di presunti lettori esso è destinato?

Non è facile rispondere in poche e convincenti parole. Riuscirebbe più agevole, ma superfluo, farlo alla fine del libro. Riteniamo quindi più spedito dire subito ciò che questo libro *non* vuol essere. Non abbiamo inteso scrivere un testo di fisica. Né esporre in ordine sistematico gli elementi fenomenologici e teorici della fisica. Abbiamo piuttosto inteso disegnare a larghi tratti i tentativi dell'intelletto umano, volti a scoprire un nesso fra il mondo delle idee e il mondo dei fenomeni. Abbiamo cercato di mostrare quali siano le forze agenti che inducono la scienza a concepire idee rispondenti alla realtà del mondo in cui viviamo. Ma la nostra esposizione doveva essere semplice e piana. Attraverso il dedalo di fatti e di concetti dovevamo scegliere la via maestra che ci pareva più caratteristica, spedita e significativa. Fenomeni e teorie fuori strada dovevano venire fatalmente trascurati, il nostro proposito originario imponendoci una cernita rigorosa dei fatti e delle idee. L'importanza di un problema non deve giudicarsi dal novero delle pagine che gli sono dedicate. Ancorché essenziali, talune tendenze di pensiero non sono menzionate, non perché noi le si tenga in poco conto, ma soltanto perché lontane dalla via che abbiamo prescelta.

Durante la redazione del libro ci siamo molto preoccupati delle caratteristiche del nostro presunto lettore e ne abbiamo discusso a lungo. Lo abbiamo supposto dotato di molte qualità atte a compensare una totale mancanza di cognizioni concrete in fatto di fisica e matematica. Lo abbiamo immaginato pieno d'interesse per le idee

fondamentali della fisica e della filosofia e abbiamo debitamente apprezzato la gran dose di pazienza di cui egli deve essere provvisto per perseverare nella lettura delle pagine meno interessanti o più astruse. Egli deve, infatti, rendersi conto che per ben capire il contenuto di una pagina qualsiasi, occorre aver letto le precedenti. Egli sa certamente che un libro di scienza, per quanto volgarizzata, non può leggersi allo stesso modo di un romanzo.

Questo libro non vuol essere nulla più di una familiare conversazione fra il lettore e noi. Esso potrà apparire noioso o interessante, monotono o stimolante, ma il nostro intento sarà raggiunto, se queste pagine indurranno il lettore a meditare sull'eterna lotta impegnata dall'inventivo intelletto umano, per giungere a una miglior comprensione delle leggi che governano i fenomeni fisici.

A. E. - L. I.



## *Parte prima*

L'ascesa dell'interpretazione meccanicistica



## Il romanzo giallo perfetto

Nel regno della fantasia il romanzo giallo perfetto esiste.

Tale romanzo fornisce tutti gli indizi voluti e c'induce a costruire per conto nostro una teoria sul mistero che ne costituisce il soggetto. Seguendo gli indizi con la dovuta attenzione, giungiamo a una soluzione completa prima ancora che l'autore ce la riveli alla fine del volume. E, contrariamente a quanto accade con i gialli di classe inferiore, la soluzione non ci delude e ci si presenta come e quando ce l'attendevamo.

È forse lecito paragonare i lettori di un simile romanzo agli scienziati che di generazione in generazione continuano a cercare la soluzione dei misteri che il libro della natura racchiude? Il paragone non calza totalmente e in ultima analisi bisogna lasciarlo cadere; tuttavia esso ha del buono e con opportune modifiche ed estensioni può applicarsi agli sforzi della scienza per risolvere il mistero dell'universo.

Questo mistero non è stato ancora risolto; né siamo certi che esso comporti una soluzione definitiva. Le nostre letture ci hanno già molto fruttato; esse ci hanno insegnato i rudimenti del linguaggio della natura, ci hanno messo in grado di cogliere una serie d'indizi e ci hanno inoltre procurato gioie ed emozioni al seguire il lento e spesso penoso progredire della scienza. Tuttavia ci rendiamo conto che, malgrado tutti i volumi letti e assimilati, siamo ancora lontani dalla soluzione completa, ammesso, beninteso, che ne esista una. A ogni tappa ci sforziamo di trovare una spiegazione che si accordi con le correlazioni scoperte in precedenza. Non poche teorie, ammesse a titolo provvisorio, hanno spiegato molti fatti, ma una soluzione generale compatibile con tutte le correlazioni accer-

tate non è stata ancora trovata. Non di rado una teoria apparentemente perfetta si rivela inadeguata alla luce di nuove letture; fatti nuovi emergono che la contraddicono o che essa non riesce a spiegare. Ma più leggiamo e più cresce la nostra ammirazione per la perfetta composizione del libro, anche se la soluzione generale sembra allontanarsi a misura che avanziamo.

Dagli ammirevoli racconti di Conan Doyle in poi, in quasi tutti i romanzi gialli viene il momento in cui l'investigatore ha raccolto tutti gli indizi occorrenti per arrivare per lo meno a una certa tappa sulla via della soluzione. Quei fatti sembrano spesso strani, incoerenti e senza nessun rapporto tra di loro. Ciò malgrado l'acuto detective si rende conto che per il momento non è il caso di spingere più oltre le ricerche e che soltanto la pura riflessione perverrà a stabilire una correlazione fra i fatti accertati. Egli si mette allora a suonare il violino o si sprofonda nella sua poltrona fumando la pipa, e, vedi miracolo, a un tratto scopre la correlazione. Anzi, non soltanto trova una relazione fra gli indizi che gli sono già noti, ma si rende altresì conto che devono essersi prodotti taluni altri avvenimenti non ancora constatati. E siccome ora vede chiaramente da che lato bisogna cercare, può, se gli pare, avviarsi a raccogliere ulteriori conferme della sua teoria.

Lo scienziato che legge nel libro della natura, se è lecito usare una locuzione ormai stantia, deve trovare la soluzione da sé, non potendo, come spesso fanno i lettori impazienti di romanzi comuni, saltare alla fine del libro. Nel nostro caso il lettore è in pari tempo l'investigatore che cerca di spiegare, almeno parzialmente, i rapporti esistenti fra gli eventi della complessa e ricca trama. Per giungere anche soltanto a una soluzione parziale, lo scienziato deve raggruppare i fatti caotici che gli sono accessibili e renderli coerenti e intellegibili con il sussidio del proprio pensiero creatore.

Lo scopo che ci prefiggiamo con le pagine che seguono è quello di delineare a grandi tratti il lavoro dei fisici imperniato sulla pura ricerca mentale. Ci occuperemo principalmente della parte che, nell'avventuroso inseguimento della conoscenza del mondo fisico, spetta al pensiero e alle idee.

## Il primo indizio

I tentativi intesi a decifrare il grande romanzo giallo della natura sono altrettanto antichi quanto il pensiero umano. Tuttavia sono trascorsi appena più di trecento anni dacché gli scienziati cominciarono a comprendere il linguaggio in cui quel romanzo è scritto. Da allora in poi, dall'epoca cioè di Galileo e di Newton, la sua lettura ha proceduto speditamente. Mezzi e metodi d'indagine, volti a scoprire e a seguire nuovi indizi, vennero sempre più accresciuti e perfezionati. Fu così possibile risolvere alcuni degli enigmi della natura; tuttavia in non pochi casi le soluzioni proposte inizialmente sono apparse effimere e superficiali, alla luce di ulteriori indagini.

Uno dei problemi fondamentali, durante millenni completamente oscurato dalla sua complessità, è quello del moto. Invero, i moti che abbiamo occasione di osservare intorno a noi, come quelli di un sasso lanciato in aria, di una nave veleggiante in mare, di un carrello spinto lungo una strada, sono tutti assai intricati. Per capire tali fenomeni è consigliabile cominciare dal più semplice dei casi per poi passare ai più complessi. Consideriamo un corpo in riposo, vale a dire del tutto privo di moto. Per cambiarne la posizione occorre esercitare su di esso un'azione qualsiasi, ossia, spingerlo, sollevarlo o ricorrere ad altri corpi, quali un cavallo o una macchina a vapore, che agiscano su di esso. La nostra idea intuitiva è che il moto sia connesso con l'azione di spingere, sollevare o tirare. Ripetute esperienze c'inducono a ritenere che bisogna spingere con maggior forza se si vuole che il corpo si muova più celermente. La conclusione che quanto maggiore è l'azione esercitata su un corpo, tanto maggiore è anche la sua velocità, si presenta come la più naturale. Una vettura a quattro cavalli è più celere di una tirata da due soli

cavalli. L'intuizione ci dice che la velocità è essenzialmente legata all'azione.

Com'è noto ai lettori di novelle poliziesche, un falso indizio imbrogliava le cose e ritardava la soluzione. Così è avvenuto nel caso del moto: il ragionamento suggerito dall'intuizione era erroneo e condusse a false idee che prevalsero durante secoli. La grande autorità di Aristotele in tutta Europa fu probabilmente la ragione principale per cui durante tanto tempo si continuò a credere nella suddetta conclusione intuitiva. Nella *Meccanica*, durante duemila anni attribuita ad Aristotele, si legge:

Il corpo in moto si arresta, allorché la forza che lo spinge non può agire più oltre in modo da spingerlo.

La scoperta e l'uso del ragionamento scientifico, a opera di Galileo, fu uno dei più importanti avvenimenti nella storia del pensiero umano e segna il vero inizio della fisica. Questa scoperta insegnò che non sempre ci si può fidare delle conclusioni intuitive basate sull'osservazione immediata, poiché esse conducono talvolta fuori strada.

Ma dov'è che l'intuizione sbaglia? È mai possibile che ci sia errore nel ritenere che una vettura tirata da quattro cavalli è più celere di una tirata da due soltanto?

Proviamo a esaminare più da vicino i fatti fondamentali del moto, partendo da esperienze quotidiane, familiari all'umanità fin dagli albori della civilizzazione e acquisite nel corso della dura lotta per l'esistenza.

Supponiamo che un uomo segua una strada dritta e piana, spingendo innanzi a sé un carrello a quattro ruote e che a un tratto cessi di spingere. Il carrello non si fermerà subito ma continuerà a muoversi per una breve distanza. Domandiamoci: come faremo per accrescere questa distanza? I mezzi idonei sono diversi e cioè ungere le ruote e spianare meglio la strada. Quanto più facilmente gireranno le ruote e quanto più liscia sarà la strada e tanto più a lungo seguirà a muoversi il carrello. Ma che cosa è avvenuto in realtà con la lubrificazione delle ruote e con il levigamento della strada? Semplicemente questo: le influenze o resistenze esterne sono state ridotte. Gli effetti di ciò che si chiama «attrito» tanto fra le ruote e il carrello, come fra le ruote e la strada, sono scemati. Questa è già

una interpretazione teorica dei fatti osservabili. Ancorché tale interpretazione possa sembrare arbitraria, atteniamoci ad essa e facciamo un altro decisivo passo avanti; troveremo l'indizio buono. Immaginiamo una strada perfettamente piana e liscia, nonché ruote assolutamente senza attrito. In tal caso nulla arresterebbe più il carrello, cosicché esso potrebbe continuare a muoversi indefinitamente. Siamo giunti a questa conclusione valendoci di un esperimento ideale che in realtà non può mai venire eseguito, poiché è materialmente impossibile eliminare tutte le influenze esterne. Questo esperimento ideale conduce all'indizio basilare della meccanica del moto.

Confrontando i due metodi di abordare il problema vediamo che secondo l'idea intuitiva quanto maggiore è la forza, tanto maggiore è la velocità, e perciò la velocità indica se forze esterne agiscono o no su un corpo. Invece, secondo il nuovo indizio scoperto da Galileo, un corpo né spinto, né tirato, né comunque sollecitato, o in altre parole un corpo sul quale non agisce nessuna forza esterna, si muove uniformemente, vale a dire sempre con la stessa velocità e lungo una linea retta. Pertanto la velocità non denota affatto se forze esterne agiscono su un corpo. La conclusione di Galileo, che è quella giusta, venne enunciata una generazione più tardi da Newton, sotto forma della *legge d'inerzia*. Questa è generalmente la prima cosa, in fatto di fisica, che a scuola s'impara a memoria e che forse qualcuno dei lettori ricorda ancora. E cioè:

Ogni corpo persevera nel suo stato di riposo, oppure di moto rettilineo uniforme, a meno che non sia costretto a cambiare tale stato da forze agenti su di esso.

Come abbiamo visto, questa legge d'inerzia non può venir desunta direttamente da un esperimento reale, ma soltanto dalla riflessione speculativa, coerente con i fatti osservati. Ancorché l'esperimento ideale non possa mai venir attuato, esso conduce a una più profonda comprensione degli esperimenti reali.

Il mondo che ci circonda presenta una grande varietà di moti assai complessi. Come primo esempio abbiamo scelto il moto uniforme. Esso è il più semplice, poiché non richiede l'azione di forze esterne. Tuttavia, il moto uniforme non può mai effettuarsi; un sasso lasciato cadere dall'alto di una torre, un carrello spinto lungo una strada non possono mai muoversi con moto uniforme, perché non è possibile eliminare totalmente l'influenza di forze esterne.

In un buon romanzo giallo gli indizi più appariscenti conducono in genere a falsi sospetti. Similmente nel nostro intento di comprendere le leggi della natura, accade non di rado che la spiegazione intuitiva più ovvia induca in errore.

Il pensiero umano crea una sempre mutevole rappresentazione dell'universo. Il contributo di Galileo ha consistito nel demolire la veduta intuitiva sostituendola con una assai diversa e nuova. Questo è il grande significato della scoperta di Galileo.

Dalla conclusione cui siamo giunti sorge immediatamente un altro quesito relativo al moto. Se la velocità non è indice delle forze esterne agenti su un corpo, qual è tale indice? La risposta a questo quesito fondamentale venne data anch'essa da Galileo e ancor più esplicitamente da Newton. Essa costituisce un ulteriore indizio ai fini della nostra investigazione.

Per trovare la risposta corretta dobbiamo riflettere un po' più profondamente sul carrello in moto, senza attrito, su una strada perfettamente liscia. In questo esperimento ideale l'uniformità del movimento è dovuta all'assenza di qualsiasi forza esterna. Immaginiamo ora che il carrello in moto uniforme riceva una spinta nella stessa direzione del moto. Che cosa accadrà? È ovvio che la velocità del carrello dovrà aumentare. Ed è altrettanto ovvio che una spinta in direzione esattamente opposta a quella del moto avrà per effetto di diminuire la velocità. Nel primo caso il carrello viene accelerato dalla spinta; nel secondo caso esso viene ritardato. Ne consegue ovviamente: l'azione di una forza esterna modifica la velocità. Pertanto non è la velocità, bensì la *variazione della velocità* o *accelerazione* che è la conseguenza dello spingere o del tirare. Forze di tal genere accrescono o riducono la velocità, secondo che agiscono nella direzione del moto o nella direzione opposta. Galileo vide ciò chiaramente e nelle sue *Due nuove scienze* scrisse:

Qualunque velocità impressa a un mobile è per sua natura invariabile, fintantoché ogni causa esterna di accelerazione o di ritardazione è assente; condizione questa che si verifica soltanto sui piani orizzontali, poiché su piani discendenti agisce una causa di accelerazione e nei piani ascendenti una causa di ritardo, donde parimenti segue che il moto sul piano orizzontale dura in eterno poiché, in quanto uniforme, non aumenta, né diminuisce e tanto meno cessa.

Seguendo il buon indizio siamo giunti a una più profonda comprensione del problema del moto. Non è, come ci suggerisce l'in-



tuizione, il legame fra forza e velocità, bensì il legame fra forza e variazione di velocità o accelerazione che costituisce la base della meccanica classica di Newton.

Forza ed accelerazione sono i due concetti che disimpegnano le parti principali in meccanica classica. Gli stessi due concetti vengono poi ampliati e generalizzati nell'ulteriore sviluppo della scienza. Conviene perciò considerarli più da vicino.

Che cosa è «forza»? Intuitivamente sentiamo ciò che deve intendersi con questo termine. È dagli sforzi fatti nello spingere, lanciare o tirare, ossia dalla sensazione muscolare che accompagna questi diversi atti, che sorse il concetto di forza. Ma la sua generalizzazione va molto al di là di questi semplici esempi. Possiamo pensare alla forza anche senza figurarci un cavallo trainante un veicolo. Parliamo della forza di attrazione fra il Sole e la Terra o fra la Terra e la Luna, nonché di quelle forze che producono le maree. Parliamo della forza mediante la quale la Terra costringe noi e tutti gli oggetti intorno a noi a rimanere entro la sua sfera d'influenza, nonché della forza con la quale il vento solleva le onde del mare e fa muovere le foglie degli alberi. Ove e quando osserviamo una variazione di velocità dobbiamo ritenere che una forza esterna, in senso generale, ne sia la causa. Newton scrisse nei suoi *Principia*:

Una forza impressa è un'azione esercitata su un corpo nell'intento di cambiarne lo stato sia di riposo, sia di moto uniforme, rettilineo.

Questa forza consiste nell'azione soltanto e non permane più a lungo nel corpo al cessare dell'azione. Difatti è soltanto in virtù della sua *vis inertiae* che un corpo conserva qualsiasi nuovo stato da esso acquisito. Le forze impresses hanno origini diverse, cioè da pressione, da percussione, da attrazione centripeta.

Il moto di un sasso lasciato cadere dalla cima di una torre è tutt'altro che uniforme; la velocità aumenta man mano che il sasso continua a cadere. Giungiamo perciò alla conclusione che una forza esterna agisce continuamente sul sasso nella direzione del moto. In altre parole: la Terra attira il sasso. Prendiamo un altro esempio. Che cosa avviene allorché un sasso è lanciato in alto? La velocità seguita a diminuire finché il sasso raggiunge il suo punto più elevato, per poi cominciare a cadere. Questa diminuzione di velocità è causata dalla stessa forza che accelera il sasso o qualsiasi corpo in caduta. In un caso la forza agisce nella stessa direzione del moto;

nell'altro caso essa agisce nella direzione opposta al moto. La forza è la medesima, ma produce accelerazione (accelerazione positiva) o ritardo (accelerazione negativa) secondo che il sasso è lasciato cadere o lanciato in alto.

## Vettori

Tutti i moti considerati fin qui sono rettilinei, si effettuano cioè lungo linee rette. Dobbiamo ora fare un passo avanti. Si perviene a intendere le leggi della natura analizzando i casi più semplici e astraendo, nei primi tentativi, da ogni complicazione. Una retta è più semplice di una linea curva. Ma l'intendimento del solo moto rettilineo non può soddisfarci. I moti della Luna, della Terra e dei pianeti, i moti cioè ai quali i principi della meccanica vennero applicati con successo strepitoso, si effettuano lungo linee curve. Il passaggio dal moto rettilineo al curvilineo presenta nuove difficoltà. Dobbiamo avere il coraggio di sormontarle se vogliamo arrivare a intendere i principi della meccanica classica, principi basati sui primi indizi che costituirono il punto di partenza dello sviluppo della scienza.

Consideriamo un altro esperimento ideale. Supponiamo che una sfera perfetta rotoli uniformemente sopra un tavolo perfettamente liscio. Sappiamo che impartendo un urto alla sfera, vale a dire applicando ad essa una forza esterna, la sua velocità subirà una variazione. Supponiamo ora che la direzione della percossa non coincida, come nell'esempio del carrello, con la linea del moto, ma che abbia una direzione diversa, diciamo perpendicolare a questa linea. Che cosa farà la sfera? Possiamo distinguere tre fasi nel nostro esperimento e cioè il moto iniziale, l'azione della forza e il moto finale, dopo che la forza ha cessato di agire. Conformemente alle leggi d'inerzia le velocità, sia prima, sia dopo l'azione della forza, saranno perfettamente uniformi. Tuttavia fra il moto uniforme prima e il moto uniforme dopo l'azione della forza, vi sarà una differenza: la direzione sarà diversa. Il percorso iniziale della sfera e la direzione

della forza sono, come abbiamo detto, perpendicolari l'uno all'altra. Il moto finale non seguirà né l'una, né l'altra di queste due linee, bensì un corso intermedio e precisamente più vicino alla direzione della forza se la percossa è vigorosa e la velocità iniziale piccola; più vicino alla linea originale del moto se la percossa è debole e la velocità iniziale grande. La nostra nuova conclusione basata sulla legge d'inerzia è dunque la seguente: in generale, l'azione di una forza esterna non modifica soltanto la velocità, bensì anche la direzione del moto. L'intendimento di questo fatto prepara la generalizzazione introdotta in fisica con il concetto di *vettore*.

Possiamo continuare a valerci del nostro metodo di ragionamento diretto. Il punto di partenza è sempre quello della legge di inerzia di Galileo. Siamo lontani dall'aver esaurito le conseguenze cui può giungersi seguendo questo filo conduttore così prezioso per la soluzione dell'enigma del moto.

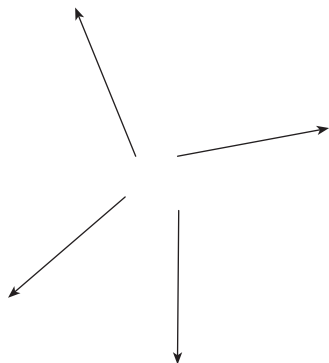
Consideriamo due sfere che si muovono in direzioni differenti su una tavola liscia. Agli effetti di una visione più concreta, possiamo supporre che le due velocità siano fra loro perpendicolari. Poiché nessuna forza esterna agisce sulle due sfere, i loro moti saranno perfettamente uniformi. Supponiamo inoltre che le loro velocità siano uguali, vale a dire che entrambe le sfere percorrano la stessa distanza nello stesso intervallo di tempo. Ma è forse corretto dire che le nostre due sfere hanno la stessa velocità? La risposta può essere sì o no. Se i tachimetri di due vetture segnano sessanta chilometri all'ora, si suol dire che esse hanno la stessa velocità, anche se seguono direzioni diverse. Ma la scienza deve crearsi un linguaggio e dei concetti suoi propri. All'inizio i concetti scientifici sono sovente quelli stessi dei quali si serve il linguaggio comune per i consueti bisogni della vita; ma in seguito quei concetti si sviluppano spesso in modo anche molto diverso; si trasformano, perdono l'ambiguità di cui sono affetti nel linguaggio comune e guadagnano in precisione, così da poter trovare applicazione nel dominio del pensiero scientifico.

Dal punto di vista del fisico, conviene assai più dire che due sfere che si muovono in direzioni diverse possiedono velocità diverse. Benché non si tratti che di una mera convenzione, è meglio dire che quattro vetture, le quali partendo dalla stessa località seguono strade diverse, non hanno la stessa velocità anche se le grandezze numeriche segnate da tutti e quattro i tachimetri sono di sessanta chi-

lometri l'ora. Questa differenziazione fra valore numerico o scalare della velocità e velocità propriamente detta, o vettoriale, mostra come la fisica, partendo da un concetto in uso nella vita di tutti i giorni, possa modificarlo in maniera feconda per lo sviluppo ulteriore della scienza.

Quando si misura una quantità, il risultato viene espresso da un certo numero di unità. La lunghezza di una canna può essere 2 metri e 50, il peso di un dato oggetto 1500 grammi, un intervallo di tempo tanti minuti o tanti secondi. In ognuno di questi casi il risultato della misura è espresso da un numero. Ma un numero soltanto non basta per caratterizzare taluni concetti fisici. Il riconoscimento di questo fatto ha segnato un netto progresso nell'indagine scientifica. Per caratterizzare una velocità, ad esempio, una direzione è altrettanto essenziale quanto un numero. Una quantità tale, che possiede non soltanto una grandezza ma anche una direzione, viene chiamata *vettore*. Il simbolo appropriato per rappresentarla è una freccia. Una velocità può essere rappresentata mediante una freccia o, per meglio dire, mediante un vettore la cui lunghezza espressa in unità prestabilite ci dà la misura della velocità e la cui direzione è quella del moto.

Se quattro vetture partono da una stessa località in direzioni diverse, ma con una stessa velocità scalare, le loro velocità vettoriali possono essere rappresentate da quattro vettori della stessa lunghezza, come mostra il disegno qui sotto.

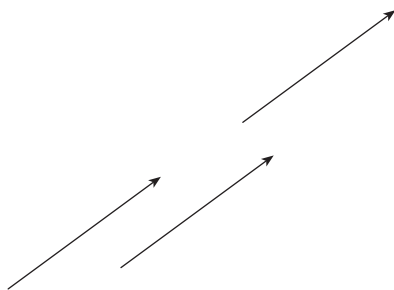


Alla scala di cui ci serviamo, un centimetro rappresenta 20 chilometri all'ora. In tal modo una velocità qualsiasi può essere rappresentata da un vettore e inversamente un simile diagramma vettoriale permette, quando la scala sia nota, di conoscere la velocità.

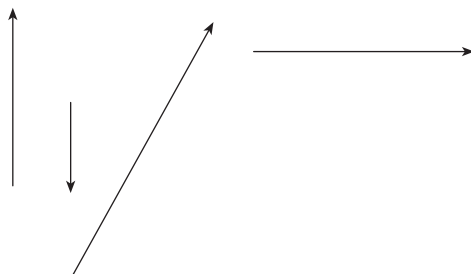
Se due vetture s'incrociano su una strada e i loro tachimetri segnano 60 chilometri l'ora, potremo rappresentare le loro velocità mediante due differenti vettori le cui frecce puntano in direzioni opposte.



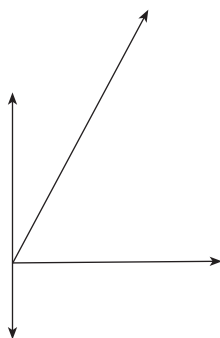
È così che le direzioni opposte dei treni verso il nord o verso il sud, ad esempio, vengono indicate con frecce opposte. Ma tutti i treni che passano verso nord, davanti a diverse stazioni, o su binari diversi paralleli, con la stessa velocità scalare, possiedono tutti la stessa velocità vettoriale, il che si può indicare con uno stesso vettore. Un simile vettore non indica davanti a quale stazione il treno passa né su quale dei binari paralleli esso corre.



In altri termini tutti i vettori tracciati qui sopra possono, in conformità alla convenzione accettata, venire considerati come uguali; essi infatti sono situati sulla stessa retta o su rette parallele, possiedono la stessa lunghezza e le loro frecce puntano nella stessa direzione.

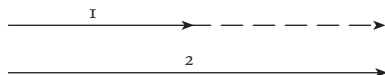


La figura qui sopra rappresenta invece vettori differenti, perché si distinguono o per la lunghezza, o per la direzione o per entrambe. Gli stessi quattro vettori possono venir tracciati in altro modo, vale a dire dando a tutti essi un'origine comune. Ma poiché l'origine non ha importanza, detti vettori possono anche rappresentare le velocità di quattro vetture situate in località diverse che si spostano con le velocità scalari e nelle direzioni indicate.

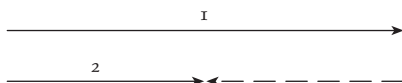


Possiamo ora giovarci di questa rappresentazione vettoriale per descrivere i moti rettilinei discussi nei capitoli precedenti. Vi abbiamo parlato di un carrello in moto uniforme, lungo una retta, il quale riceve una spinta nella direzione del moto, cosicché la sua velocità aumenta. Questo fatto può venir raffigurato graficamente median-

te due vettori, uno più corto che rappresenta la velocità prima della spinta e uno più lungo, avente la stessa direzione, e che rappresenta la velocità dopo la spinta.



Il significato del vettore tratteggiato è chiaro. Esso rappresenta la variazione della velocità per effetto della spinta. Nel caso in cui la forza è diretta in senso contrario al moto, motivo per cui questo risulta rallentato, il diagramma è alquanto diverso. Il vettore tratteggiato corrisponde di nuovo a una variazione di velocità, ma in questo caso la sua direzione non è più la stessa.



È dunque chiaro che sono vettori non soltanto le velocità, bensì anche le loro variazioni. E siccome ogni variazione di velocità è dovuta all'azione di una forza esterna, anche quest'ultima dovrà venire rappresentata da un vettore. Per caratterizzare una forza non basta infatti indicare in che misura spingiamo il carrello, occorre anche indicare in quale direzione lo spingiamo. La forza, così come la velocità o la variazione di questa, va rappresentata da un vettore e non soltanto da un numero. Pertanto anche la forza esterna è un vettore e possiede la stessa direzione della variazione di velocità. Negli ultimi due diagrammi i vettori tratteggiati indicano la direzione della forza altrettanto esattamente come indicano la variazione di velocità.

Qui uno scettico potrebbe osservare di non scorgere nessun vantaggio nell'uso dei vettori. In verità, tutto quanto è stato detto al riguardo non è che la traduzione in un linguaggio insolito e ostico di fatti già accertati. Per ora sarebbe dunque difficile convincere il nostro scettico che ha torto. Per ora infatti egli ha tutte le ragioni. Ma non tarderemo a vedere che questo strano linguaggio conduce a una generalizzazione importante, nella quale i vettori disimpegnano una parte essenziale.



## L'enigma del moto

Finché consideriamo soltanto il moto lungo una retta, siamo lungi dall'intendere i movimenti che si osservano nella natura. Dobbiamo considerare anche il moto lungo linee curve, e il nostro compito immediato è quello di determinare le leggi che lo governano. Il compito non è agevole. Nel caso del moto rettilineo i nostri concetti di velocità, di variazione di velocità e di forza si sono dimostrati assai utili. Ma non si vede subito come essi possano venir applicati al moto curvilineo. Si può infatti pensare che i vecchi concetti siano impropri a una descrizione generale del moto e che occorra crearne dei nuovi. Dobbiamo provare a battere la vecchia strada o dobbiamo piuttosto cercarne una nuova?

La generalizzazione di un determinato concetto è un procedimento spesso usato in scienza. Non esiste un metodo di generalizzazione, determinato in modo univoco, e abitualmente si può procedere per vie diverse. Una condizione però dev'essere sempre rigorosamente soddisfatta: ogni concetto generalizzato deve potersi ricondurre al concetto primitivo ogni qual volta si realizzano le condizioni primitive.

Ciò può venir meglio spiegato prendendo a mo' d'esempio la questione di cui ci siamo occupati fin qui. Possiamo provare a generalizzare i vecchi concetti di velocità, di variazione di velocità e di forza estendendoli al moto curvilineo. Tecnicamente, quando si parla di curve, le linee rette vi s'intendono incluse. La retta non è infatti che un caso particolare e banale della linea curva. Se dunque i concetti di velocità, di variazione di velocità e di forza vengono adottati per il moto curvilineo, essi dovranno potersi automaticamente applicare al moto lungo una retta. Beninteso il risultato non dovrà esse-

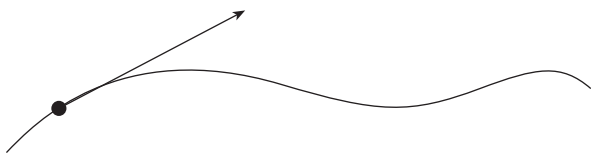
re in contraddizione con i risultati ottenuti precedentemente. Se cioè la curva si trasforma in una retta, tutti i concetti generalizzati dovranno ricondursi ai concetti familiari coi quali abbiamo descritto il moto rettilineo. Questa condizione non è tuttavia sufficiente per determinare la generalizzazione in maniera univoca. Essa lascia la via aperta a molte possibilità. La storia della scienza sta a provare che le generalizzazioni più semplici si sono mostrate talvolta feconde, ma talvolta anche sterili. Dobbiamo cominciare col fare una congettura. Nel nostro caso la congettura per trovare il metodo corretto di generalizzazione è semplice. Vedremo che i nuovi concetti si dimostrano assai fecondi e che ci aiutano a capire tanto il moto di un sasso lanciato in aria, quanto il moto dei pianeti.

Qual è il significato preciso delle parole: velocità, variazione di velocità e forza, nel caso generale del moto curvilineo? Cominciamo con la velocità. Supponiamo che un corpo piccolissimo, o come si usa dire una particella, si muova lungo una curva da sinistra a destra.



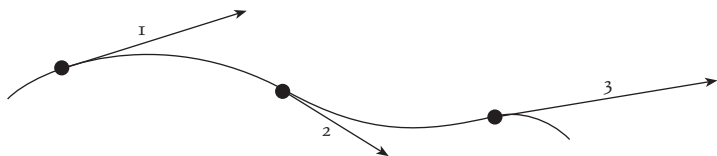
Nel nostro disegno, il punto sulla curva mostra la posizione della particella in un dato istante. Qual è la velocità che corrisponde a tale istante e a tale posizione? È ancora il filo conduttore trovato da Galileo che ci aiuta a rispondere. Dobbiamo ricorrere nuovamente all'immaginazione ed escogitare un esperimento ideale. La particella si muove lungo la curva da sinistra a destra, sotto l'influenza di forze esterne. Immaginiamo che in un dato istante e nel punto segnato sulla curva, tutte quelle forze cessino bruscamente di agire. Da quell'istante, conformemente alle leggi d'inerzia, il moto diverrà uniforme. Per la verità, in pratica, non è possibile liberare un corpo da ogni influenza esterna. Possiamo soltanto congetturare «ciò che accadrebbe se...» e quindi giudicare se la nostra congettura sia fondata o meno, prendendo in esame le conclusioni che se ne possono trarre e la loro concordanza con l'esperienza.

Nel disegno che segue, il vettore indica la supposta direzione del moto uniforme, qualora tutte le forze esterne svanissero. È la direzione della cosiddetta tangente. Osservando una particella in movimento con il microscopio, vediamo insieme una piccolissima porzione della curva che ha l'apparenza di un brevissimo segmento. La tangente è il prolungamento di questo segmento, cosicché il vettore tracciato rappresenta la velocità in quel dato istante. Il vettore-velocità è dunque situato lungo la tangente e la sua lunghezza rappresenta la grandezza numerica della velocità, né più né meno, come potrebbe indicarla il tachimetro di una vettura.



Il nostro esperimento ideale basato sull'arresto subitaneo del movimento, allo scopo di determinare il vettore-velocità, non dev'essere preso troppo alla lettera. Esso ci aiuta soltanto a intendere ciò che dobbiamo chiamare vettore-velocità e ci pone in grado di determinarlo per un dato istante, in un dato punto.

Nel disegno che segue si vedono i vettori-velocità per tre posizioni diverse di una particella, in movimento lungo una curva. In questo caso non è soltanto la direzione, bensì anche la grandezza della velocità, indicata dalla lunghezza del vettore, che varia nel corso del moto.



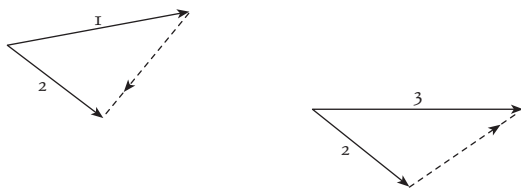
Questo nuovo concetto della velocità soddisfa la condizione fondamentale per tutte le generalizzazioni? In altri termini può esso ricondursi al concetto familiare, qualora la curva si trasformi in una retta? Certamente che sì. La tangente alla linea retta si confonde

con questa; e il vettore-velocità si trova allora situato sulla linea del movimento, né più né meno come nei precedenti esempi del carrello in corsa o della sfera rotolante.

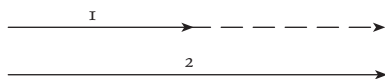
Facciamo ora un altro passo avanti. Impartiamo una variazione di velocità a una particella in moto lungo una curva. Ciò può farsi in più modi, fra i quali sceglieremo il più semplice e pratico.

Il nostro ultimo disegno ci mostra più vettori-velocità che rappresentano la direzione del moto in differenti punti della traiettoria. Tracciamo ora i primi due a partire da un'origine comune, il che, come abbiamo visto, è lecito fare con i vettori.

Il vettore tratteggiato lo chiamiamo variazione di velocità. La sua origine coincide con l'estremità del primo vettore e il suo punto estremo con l'estremità del secondo.



Questa definizione della variazione di velocità potrebbe sembrare di primo acchito artificiosa e priva di senso. Diviene più chiara nel caso particolare in cui i vettori 1 e 2 abbiano la stessa direzione. Ciò significa infatti che si passa al caso particolare del moto rettilineo. Dando ai due vettori la stessa origine, le loro estremità si trovano di nuovo congiunte dal vettore tratteggiato. Il disegno è ora identico a quello di p. 30 e ritroviamo il concetto primitivo come caso particolare del nuovo concetto. Nel nostro disegno abbiamo dovuto separare le due linee, che di fatto si confondono e non si distinguono l'una dall'altra.



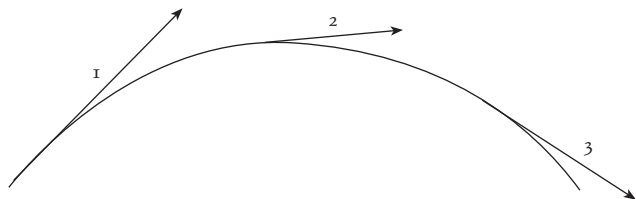
Resta ancora da fare l'ultimo passo del nostro procedimento di generalizzazione, passo che c'induce a ricorrere alla più importan-

te delle congetture fatte fin qui, ovverosia a stabilire la correlazione tra forza e variazione di velocità, in modo da ricavarne un indizio che ci permetta d'intendere il problema del moto in maniera generale.

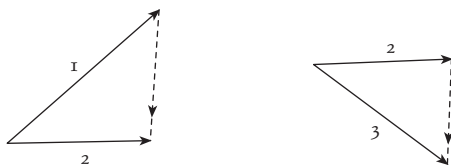
L'indizio per giungere alla spiegazione del moto rettilineo era semplice: una forza esterna è la causa della variazione di velocità e il vettore-forza ha la stessa direzione come la variazione. Qual è ora l'indizio per il moto curvilineo? Esattamente lo stesso, con la sola differenza che la variazione di velocità ha ora un significato più largo di prima. Uno sguardo ai vettori tratteggiati degli ultimi due disegni mette la cosa in piena luce. Dove la velocità sia nota per tutti i punti della curva, la direzione della forza in un punto qualunque può subito dedursi. Basta tracciare i vettori-velocità per due istanti separati da un *brevissimo* intervallo di tempo e corrispondenti perciò a delle posizioni *vicinissime*. Diremo allora che *il terzo vettore congiungente l'estremità del primo vettore all'estremità del secondo indica la direzione della forza agente*. È tuttavia essenziale che i due vettori-velocità siano separati soltanto da un *brevissimo* intervallo di tempo. L'analisi delle espressioni *vicinissimo* e *brevissimo* è lungi dall'essere semplice. È infatti questa analisi che ha condotto Newton e Leibniz alla scoperta del calcolo infinitesimale.

È una via dura e accuratamente tracciata quella che conduce alla generalizzazione dell'idea direttrice di Galileo. Non possiamo purtroppo soffermarci a mostrare quanto numerose e feconde siano state le conseguenze di questa generalizzazione. Le sue applicazioni conducono a spiegazioni, semplici e convincenti, di molti fatti che anteriormente sembravano incoerenti ed erano male intesi.

Fra la ricchissima varietà dei moti sceglieremo soltanto i più semplici applicando loro la legge sopra enunciata. Un obice sparato da un cannone, un sasso lanciato con una certa inclinazione, il getto d'acqua di una lancia d'innaffiamento, descrivono traiettorie ben note e dello stesso genere, e cioè parabole. Supponiamo che un tachimetro sia legato a un sasso in modo che possa tracciarsi in qualsiasi istante il corrispondente vettore-velocità e ammettiamo che il risultato sia quello rappresentato dal disegno a pagina seguente. La direzione della forza agente su un sasso è esattamente la stessa di quella della variazione di velocità e abbiamo già visto come essa possa venir determinata.

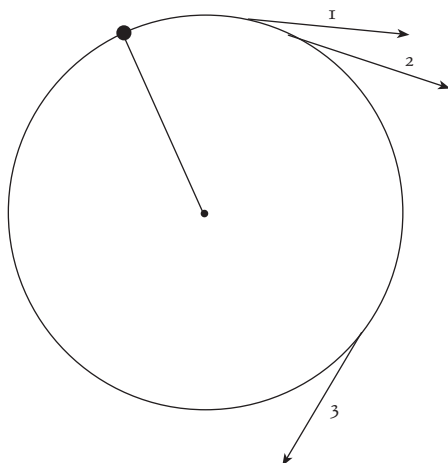


Il risultato, come mostrano i diagrammi vettoriali seguenti, è che la forza è verticale e diretta verso il basso. È esattamente ciò che avviene allorché si lascia cadere un sasso dalla cima di una torre.

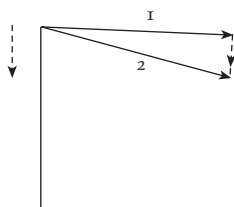


In tal caso la traiettoria è diversa come lo sono anche le velocità, ma la variazione di velocità ha la stessa direzione, e cioè verso il centro della Terra.

Un sasso legato all'estremità di una corda e che viene fatto ruotare in un piano orizzontale, descrive una traiettoria circolare. Tutti i vettori nel disegno raffigurante tale moto hanno la stessa lunghezza, sempre che la velocità scalare sia uniforme. Ma la velocità vettoriale non può dirsi che lo sia, poiché la traiettoria non è una linea retta. Ricordiamo che soltanto se rettilineo e uniforme, il moto non richiede l'intervento di una forza. Qui, invece, agisce una forza costante e la velocità varia non di grandezza ma di direzione. In conformità alla legge fondamentale del moto dev'esserci una causa responsabile di tale variazione e nel nostro caso si tratta precisamente di una forza che si esercita fra il sasso e la mano che tiene la corda. Qui sorge subito un quesito: in quale direzione agisce la forza? Di nuovo un diagramma vettoriale fornisce la risposta. Si tracciano i vettori-velocità per due punti molto vicini e poi il vettore della variazione di velocità.



Quest'ultimo, come si vede, è diretto lungo la corda verso il centro del cerchio ed è sempre perpendicolare al vettore-velocità ovvero alla tangente. In altri termini la mano esercita una forza sul sasso, per mezzo della corda.



Molto simile è l'interessante caso della rivoluzione della Luna intorno alla Terra, rivoluzione che può considerarsi come un moto circolare approssimativamente uniforme. La forza è diretta verso la Terra per la stessa ragione per cui era diretta verso la mano nell'esempio precedente. È bensì vero che non c'è una corda che legghi la Terra alla Luna, ma possiamo immaginare una linea congiungente i centri di questi due corpi, nonché una forza agente lungo questa linea e diretta verso il centro della Terra, né più né meno come la forza che agisce su un sasso lanciato in aria o lasciato cadere dalla cima di una torre.

Tutto quanto abbiamo detto riguardo al moto può riassumersi in un'unica proposizione: *La forza e la variazione di velocità sono vettori aventi la medesima direzione*. È questo il primo indizio per la soluzione del problema del moto, ma non è sufficiente per fornire una spiegazione completa di tutte le specie di moto che possiamo osservare. Il passaggio dalla maniera di pensare di Aristotele a quella di Galileo ha fornito la prima pietra angolare della scienza. Una volta compiutasi la rottura nel modo di pensare, l'indirizzo dello sviluppo ulteriore si delineava chiaramente. In questi capitoli ci interessiamo alle prime fasi dello sviluppo, seguendo le vie iniziali e mostrando come, dalla penosa lotta contro le vecchie idee, siano sorti i nuovi concetti fisici. La nostra attenzione è rivolta essenzialmente sia al lavoro dei pionieri della scienza, consistente nel trovare nuove e inattese possibilità di sviluppo, sia all'avventurosa storia del pensiero scientifico, creatore di un'immagine di volta in volta mutevole dell'universo. I primi passi decisivi assumono sempre un carattere rivoluzionario. Allorché l'immaginazione scientifica trova i vecchi concetti troppo angusti, li sostituisce con dei nuovi. Lo sviluppo progressivo lungo vie già tracciate conserva carattere evolutivo, fin tanto che non si pervenga a una svolta che conduce alla conquista di un nuovo campo. Ma per bene intendere quali siano le difficoltà e le ragioni che ci costringono a modificare concetti basilari non basta conoscere le indicazioni iniziali, occorre anche rendersi conto delle conclusioni che se ne possono trarre.

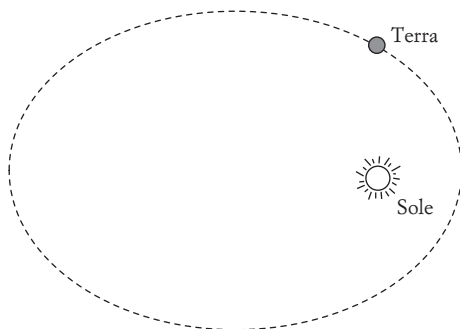
Una delle caratteristiche più notevoli della fisica moderna è che le conclusioni tratte dalle indicazioni iniziali non sono soltanto qualitative, bensì anche quantitative. Riprendiamo l'esempio della pietra lasciata cadere dalla cima di una torre. Abbiamo visto che la sua velocità cresce nel corso della caduta; ma vorremmo naturalmente saperne di più. Qual è la grandezza della variazione di velocità? Quali sono la posizione e la velocità della pietra in un istante qualsiasi, dacché ha cominciato a cadere? Vorremmo essere in grado di predire gli eventi e di verificare sperimentalmente se le nostre previsioni, e pertanto anche le supposizioni iniziali, trovano conferma.

Per trarre delle conclusioni quantitative, dobbiamo ricorrere al linguaggio matematico. La maggior parte delle idee fondamentali della scienza sono essenzialmente semplici e possono generalmente esprimersi nel linguaggio che tutti capiscono. Ma per seguire tali



idee da vicino, bisogna ricorrere a una tecnica investigativa raffinatissima. Le matematiche, come mezzo di ragionamento, sono indispensabili se si vogliono trarre conclusioni verificabili con l'esperimento. Possiamo però fare a meno del linguaggio matematico finché ci occupiamo soltanto delle idee fondamentali della fisica. E poiché in queste pagine è nostro proposito di non occuparci d'altro, ci vedremo talvolta costretti a citare, senza dimostrazione, taluni risultati indispensabili per intendere i punti di vista che ci si presenteranno negli sviluppi ulteriori. Il prezzo che si deve pagare con la rinuncia al linguaggio matematico è una perdita in precisione cui si aggiunge la necessità di citare talvolta dei risultati, senza mostrare come siano stati ottenuti.

Un esempio molto importante del moto è quello della Terra intorno al Sole, lungo una traiettoria che, come tutti sanno, è una curva chiusa detta ellisse. La costruzione di un diagramma vettoriale della variazione di velocità, mostra che la forza agente sulla Terra è diretta verso il Sole.



Ma tutto sommato, questa è un'informazione assai magra. Vorremmo essere in grado di predire la posizione della Terra e degli altri pianeti in qualsiasi istante, e di predire altresì la data e la durata della prossima eclisse solare e di molti altri fatti astronomici. Tutto ciò si può fare, non però servendoci soltanto del nostro primitivo filo conduttore poiché occorre ora conoscere non soltanto la direzione della forza, ma anche il suo valore assoluto, la sua grandezza. Fu Newton che a questo riguardo fece la congettura giusta. Conformemente alla sua *legge della gravitazione*, la forza di attrazione fra due

corpi dipende, in modo assai semplice, dalla distanza che li separa l'uno dall'altro. La forza diminuisce quando la distanza aumenta. Più precisamente essa diventa  $2 \times 2 = 4$  volte minore se la distanza viene raddoppiata;  $3 \times 3 = 9$  volte minore se la distanza viene triplicata, e così via.

Vediamo dunque che nel caso della forza di gravitazione è stato possibile esprimere in modo semplice la dipendenza della forza dalla distanza che separa due corpi in moto.

Si procede in modo analogo negli altri casi in cui le forze agenti sono d'altra specie, come quelle magnetiche, elettriche e altre. Si tende a esprimere la forza in termini semplici, ma beninteso simili espressioni sono ritenute valide soltanto se le conclusioni che se ne traggono trovano conferma nell'esperimento.

Quanto abbiamo appreso sin qui sulla forza di gravitazione, non basta ancora per descrivere il moto dei pianeti. Abbiamo già visto che i vettori rappresentanti la forza e la variazione di velocità per un breve intervallo di tempo hanno la stessa direzione. Dobbiamo ora seguire Newton e fare un altro passo avanti supponendo che esista una relazione semplice fra le lunghezze dei vettori stessi. Ammesso che tutte le altre condizioni siano uguali, considerando cioè il medesimo corpo in moto e le medesime variazioni, durante intervalli di tempo uguali, la variazione di velocità, è, secondo Newton, proporzionale alla forza.

Vediamo così che due congetture supplementari sono necessarie per giungere a conclusioni quantitative circa il moto dei pianeti. Una di esse è d'indole generale e stabilisce una relazione fra la forza e la variazione di velocità. L'altra è di carattere particolare e stabilisce una precisa dipendenza tra una forza di data specie e la distanza fra due corpi. La prima è la legge del movimento di Newton, la seconda la sua legge di gravitazione. Insieme esse determinano il moto. A chiarimento ulteriore si può ricorrere a un ragionamento che può sembrare un po' astruso. Supponiamo che sia possibile determinare posizione e velocità di un pianeta in un dato istante e che si conosca la forza. In tal caso, in conformità alle leggi di Newton, conosciamo anche la variazione di velocità durante un breve intervallo di tempo. E conoscendo la velocità iniziale e la sua variazione potremo determinare velocità e posizione del pianeta al termine dell'intervallo di tempo. Con una continua ripetizione di questo

procedimento, si potrà tracciare l'intera traiettoria del pianeta in moto, senza ricorrere ad altre osservazioni. Questo metodo è tutt'altro che pratico, ma è in base a un procedimento analogo che la meccanica predice la traiettoria di un corpo in moto.

Il procedimento appena menzionato, che consiste nell'avanzare passo a passo, risulterebbe in pratica assai penoso e impreciso. Fortunatamente esso non è affatto necessario; la matematica offre una via infinitamente più breve, fornendo la descrizione del moto con molto meno inchiostro di quello occorrente per scrivere una sola frase. Le conclusioni alle quali si giunge in tal modo possono essere o confermate o confutate dall'osservazione.

La forza esterna che agisce sul sasso in caduta o sulla Luna in moto lungo la sua orbita, è la stessa: l'attrazione che la Terra esercita sui corpi materiali. Newton riconobbe che il moto dei sassi in caduta, quello della Luna e quello dei pianeti non sono altro che casi particolari della *forza di gravitazione universale*, sempre in azione fra due corpi qualsiasi. Nei casi semplici il moto corrispondente può venir descritto e predetto con l'ausilio delle matematiche. In casi remoti e molto complessi, implicanti le reciproche azioni di più corpi, la descrizione non è così semplice, ma i principi fondamentali sono gli stessi.

Le conclusioni alle quali eravamo giunti seguendo i nostri primi indizi, le troviamo realizzate così nel moto di un sasso lanciato, come nel moto della Luna, della Terra e dei pianeti.

In verità è il nostro intero sistema congetturale che deve essere confermato o confutato dall'esperimento. Non è lecito isolare nessuna delle nostre supposizioni per verificarla separatamente. Per i pianeti circolanti intorno al Sole si constata che il sistema meccanico si addice perfettamente. Tuttavia potremmo immaginare un altro sistema basato su altre supposizioni e altrettanto confacente.

I concetti fisici sono creazioni libere dell'intelletto umano e non vengono, come potrebbe credersi, determinati esclusivamente dal mondo esterno. Nello sforzo che facciamo per intendere il mondo rassomigliamo molto all'individuo che cerca di capire il meccanismo di un orologio chiuso. Egli vede il quadrante e le sfere in moto, ode il tic-tac, ma non ha modo di aprire la cassa. Se è ingegnoso, egli potrà farsi una qualche immagine del meccanismo che considera responsabile di tutto quanto osserva, ma non sarà mai certo che tale

immagine sia la sola suscettibile di spiegare le sue osservazioni. Egli non sarà mai in grado di confrontare la sua immagine con il meccanismo reale e non potrà neanche rappresentarsi la possibilità e il significato di simile confronto. Tuttavia egli crede certamente che con il moltiplicarsi delle sue cognizioni la sua immagine della realtà diverrà sempre più semplice e sempre più adatta a spiegare domini via via più estesi delle sue impressioni sensibili. Egli potrà anche credere all'esistenza di un limite ideale della conoscenza, a cui l'intelletto umano può avvicinarsi indefinitamente, e potrà chiamare verità obiettiva tale limite.

## Un indizio negletto

Studiando la meccanica si riceve l'impressione che, in questo ramo della scienza, tutto è semplice, fondamentale e sistemato per sempre. Non si sospetta nemmeno lontanamente l'esistenza di un importante indizio, sfuggito a tutti per trecento anni. Questo indizio negletto è connesso con uno dei concetti fondamentali della meccanica: quello di *massa*.

Torniamo ancora al semplice esperimento ideale del carrello su una strada spianata alla perfezione. Se inizialmente il carrello si trova a riposo e poi riceve una spinta, esso si metterà in moto uniforme, con una data velocità. Supponiamo di poter ripetere l'esperimento a volontà e in condizioni tali che il meccanismo della spinta funzioni sempre in modo identico, esercitando cioè ogni volta la medesima forza sul medesimo carrello. Per quante volte l'esperimento venga ripetuto, la velocità risultante sarà sempre la stessa. Ma che succederà se modifichiamo l'esperimento caricando il carrello che prima era vuoto? La velocità risultante del carrello carico sarà indubbiamente inferiore a quella del carrello vuoto. Ne consegue: se la stessa forza agisce su due corpi diversi, entrambi inizialmente a riposo, le velocità risultanti saranno anch'esse diverse. Diremo perciò che la velocità dipende dalla massa del corpo e che è tanto minore quanto maggiore è la massa.

Sappiamo, dunque, per lo meno in teoria, come determinare la massa di un corpo o, più esattamente, quante volte una massa è più grande di un'altra. Ogni qual volta, in presenza di forze identiche, agenti su due masse inizialmente a riposo, constateremo che la velocità della prima massa è tre volte superiore alla velocità della seconda, concluderemo che la prima massa è tre volte inferiore alla seconda.

Questo non è davvero un modo molto pratico per determinare il rapporto fra due masse. Ma ciò non ha importanza: l'essenziale è che il risultato non cambia, seguendo qualsiasi altro metodo, basato sull'applicazione della legge d'inerzia.

Ma come procediamo in realtà per determinare praticamente la massa? Non certo nel modo testé descritto. La risposta è nota a tutti: pesando con una bilancia.

Proviamo a discutere più dettagliatamente i due differenti modi di determinare la massa.

Il nostro primo esperimento non aveva assolutamente nulla a che fare con la gravità, cioè con l'attrazione terrestre. Dopo la spinta, il carrello si muove su un piano perfettamente liscio e orizzontale. La forza di gravità che mantiene il carrello sul piano non varia, né interviene nella determinazione della massa. Le cose sono diverse con le pesate. Non sarebbe possibile fare uso della bilancia se la Terra non attirasse i corpi; se la gravità non esistesse. Il divario fra le due determinazioni della massa consiste in ciò che la prima è del tutto indipendente dalla forza di gravità e che la seconda è basata essenzialmente sull'esistenza di tale forza.

Ora chiediamo: determinando il rapporto fra due masse in ambedue i modi descritti, otteniamo lo stesso risultato? La risposta data dall'esperimento è chiarissima. I risultati sono esattamente gli stessi! È questa una conclusione che non avremmo potuto prevedere; essa è basata sull'osservazione e non già sul ragionamento. Chiamiamo, per maggior semplicità, *massa inerte* la massa determinata nel primo modo, e *massa pesante*, quella determinata nel secondo. Nel nostro mondo accade che esse siano uguali, ma è perfettamente lecito immaginare che ciò avrebbe potuto anche non essere. Sorge subito un altro interrogativo: questa identità delle due specie di massa è accidentale, o possiede un più profondo significato? Dal punto di vista della fisica classica la risposta è: l'identità delle due masse è accidentale e non le va attribuito maggior significato. La risposta della fisica moderna è precisamente l'opposto: l'identità delle due masse è fondamentale e costituisce un nuovo ed essenziale indizio conducente a una più profonda comprensione. E infatti fu questo uno dei più importanti indizi che aprirono la via allo sviluppo della cosiddetta teoria generale della relatività.

Un romanzo giallo è giudicato di qualità inferiore se spiega fatti strani come accidenti; lo troviamo assai più soddisfacente se non si discosta da una linea razionale. Parimenti, una teoria che offra una spiegazione dell'identità delle due masse – la pesante e l'inerte – è superiore a quella che interpreti tale identità come accidentale, sempre che, beninteso, le due teorie siano ugualmente in accordo con i fatti osservati.

Poiché questa identità fra massa inerte e massa pesante è basilare per la formulazione della teoria della relatività, conviene fin d'ora esaminarla più da vicino. Quali esperienze provano incontestabilmente che le due masse sono identiche? La risposta la dà l'antico esperimento con il quale Galileo lasciò cadere masse diverse da una torre. Egli constatò che il tempo richiesto dalla caduta era sempre il medesimo, e che il moto di un corpo che cade non dipende dalla massa. Il collegamento di questo semplice, ma importantissimo risultato sperimentale con l'identità della massa inerte e della massa pesante richiede un ragionamento alquanto intricato.

Un corpo a riposo risponde alla sollecitazione di una forza esterna, mettendosi in moto e raggiungendo una certa velocità. Esso obbedisce più o meno prontamente a seconda della sua massa inerte, resistendo al moto tanto più fortemente, quanto più grande è la massa. Senza pretendere al rigore possiamo dire: la prontezza con la quale corpi diversi rispondono alla sollecitazione di una stessa forza esterna – in breve il *moto rispondente* – dipende dalla massa inerte. Se la forza di attrazione della Terra fosse la stessa per tutti i corpi, quello di maggior massa dovrebbe cadere più lentamente degli altri. Ma così non è. Tutti i corpi cadono con moto uguale. Ciò significa che la forza attrattiva della Terra – ovvero la «forza sollecitante» – varia a seconda della massa. Ora, la Terra attira una pietra con la forza di gravità, senza saper niente della sua massa inerte. Dunque: 1) la *forza sollecitante* della Terra dipende dalla massa pesante; 2) il *moto rispondente* della pietra dipende dalla sua massa inerte; 3) e poiché il *moto rispondente* è sempre il medesimo – da una stessa altezza tutti i corpi cadono a un modo – dobbiamo inferire che massa pesante e massa inerte sono uguali.

Con più pedanteria, un fisico enuncerebbe la stessa conclusione in altri termini e cioè: l'accelerazione di un corpo in caduta aumenta in proporzione alla sua massa pesante e diminuisce in proporzio-

ne alla sua massa inerte, e siccome tutti i corpi in caduta hanno la medesima accelerazione costante, le due masse devono essere uguali.

Nel nostro grande romanzo giallo non vi sono problemi perfettamente risolti e sistemati per sempre. Dopo ben trecento anni siamo dovuti tornare sul problema del moto, rivederne la procedura investigativa e scoprire indizi rimasti inosservati, per giungere così a una nuova rappresentazione dell'universo circostante.



## Il calore è una sostanza?

Qui cominciamo a seguire un indizio di nuovo genere. Esso ha origine nei fenomeni termici. Ricordiamo però che non è possibile suddividere la scienza in compartimenti stagni. Non tarderemo infatti a vedere che i nuovi concetti di cui stiamo per servirci si ricollegano sia a quelli che ci sono già familiari, sia a quelli che incontreremo più avanti. Criteri maturati in un dato ramo della scienza possono, non di rado, servire a spiegare fatti di carattere, in apparenza, del tutto diverso. Avviene così che i concetti originali subiscano, talvolta, modificazioni aventi per risultato di approfondire la comprensione tanto dei fenomeni dai quali i concetti stessi procedono, quanto dei nuovi fenomeni a cui sono applicati.

I concetti basilari nella descrizione dei fenomeni calorifici sono: *temperatura* e *calore*. La storia della scienza sta a provare che la distinzione fra questi due concetti richiese un tempo incredibilmente lungo, ma che, non appena avvenuta, essa determinò un rapido progresso. Ancorché questi concetti siano familiari a tutti, li prenderemo in esame onde porne in rilievo le differenze.

Il nostro senso tattile ci avverte distintamente che un corpo è caldo e un altro freddo. Tuttavia tale criterio è meramente qualitativo, del tutto insufficiente per una valutazione quantitativa e talvolta perfino ambiguo. È facile provarlo con un notissimo esperimento, quello dei tre recipienti contenenti rispettivamente acqua fredda, tiepida e calda. Se immergiamo una mano nell'acqua fredda e l'altra nella calda riceviamo un messaggio di freddo dalla prima e di caldo dalla seconda. Se dopo ciò immergiamo entrambe le mani nell'acqua tiepida, i due messaggi che riceviamo, uno per mano, sono contraddittori. Per la medesima ragione un eschimese e un abori-

geno delle terre equatoriali che s'incontrassero a Milano, in un giorno di primavera, manifesterebbero opinioni assai diverse nel giudicare se il clima è caldo o freddo. Tutte le questioni del genere vengono decise per mezzo del termometro, strumento inventato in forma primitiva da Galileo. Anche qui ritroviamo questo nome che ci è ormai familiare! L'uso del termometro è basato su alcuni ovvi presupposti fisici. Li ricorderemo citando alcuni passi di conferenze, tenute centocinquanta anni fa circa, da Black, che portò un notevole contributo al chiarimento delle difficoltà connesse con la distinzione fra i due concetti: calore e temperatura.

Con l'uso di questo strumento abbiamo imparato che se prendiamo anche mille e più differenti specie di materia, quali metalli, pietre, sali, legni, piume, lana, acqua e altri fluidi diversi, le quali sostanze abbiano inizialmente *calori* differenti e se le collochiamo insieme in una stanza non riscaldata e nella quale non dà il sole, il calore verrà comunicato dai più caldi di questi corpi ai più freddi, nel corso di alcune ore o di una giornata intera, alla fine del quale periodo applicando a tutti essi successivamente un termometro, questo marcherà esattamente lo stesso grado.

Secondo la terminologia moderna la parola *calori* va sostituita con la parola *temperature*.

Un medico al togliere il termometro dalla bocca di un malato potrebbe ragionare così: «Il termometro palesa la propria temperatura per mezzo della lunghezza della sua colonna di mercurio. Si deve ammettere che la lunghezza di questa colonna aumenta proporzionalmente all'accrescimento della temperatura. Il termometro è rimasto durante alcuni minuti in contatto con il malato cosicché ambedue, malato e termometro, hanno la stessa temperatura. Giungo perciò alla conclusione che la temperatura del mio malato è quella segnata dal termometro». È probabile che il medico agisca macchinamente; tuttavia, anche senza pensarci, egli applica principi fisici.

Ma contiene forse il termometro la stessa quantità di calore, come il corpo del malato? Certamente che no. Supporre che due corpi contengono quantità uguali di calore soltanto perché le loro temperature sono uguali sarebbe, come diceva Black,

opinare assai avventatamente. Sarebbe confondere la quantità di calore in corpi diversi, con la sua forza generale o intensità, ancorché sia chiaro che queste sono due cose diverse, le quali dovrebbero essere tenute distinte nel riflettere sulla distribuzione del calore.

Questa distinzione può agevolmente intendersi con un esperimento assai semplice. Un chilogrammo d'acqua posto sopra una fiamma a gas richiede qualche tempo per passare dalla temperatura ambiente a quella d'ebollizione. Un tempo molto più lungo è necessario per scaldare allo stesso modo dieci chilogrammi d'acqua, nel medesimo recipiente e con la medesima fiamma. Questo fatto lo interpretiamo come indicazione che nel secondo caso occorre maggior quantità di un «qualcosa» e questo «qualcosa» lo chiamiamo *calore*.

A un altro importante concetto, quello cioè di *calore specifico*, si giunge con il seguente esperimento: due recipienti uguali, uno contenente un chilogrammo d'acqua e l'altro un chilogrammo di mercurio vengono scaldati allo stesso modo, vale a dire, con fiamme identiche. Il mercurio si scalda molto più rapidamente dell'acqua, provando così che per elevare la sua temperatura di un grado occorre minor quantità di «calore». In genere per innalzare di un grado, diciamo da 15 a 16 gradi Celsius, la temperatura di masse uguali di sostanze diverse, quali acqua, mercurio, ferro, rame, legno ecc., occorrono quantità di «calore» differenti. Diciamo perciò che ogni sostanza ha una propria *capacità calorifica*, ossia un proprio *calore specifico*.

Una volta inquadrato il concetto di calore, possiamo indagarne la natura più da vicino. Prendiamo due corpi, uno caldo e l'altro freddo o, più esattamente, uno a temperatura più elevata dell'altro. Poniamoli in contatto, tenendoli al riparo da ogni influenza esteriore. Sappiamo che presto o tardi avranno entrambi la stessa temperatura. Ma in qual modo ciò si produce? Che cosa avviene fra l'istante della messa in contatto dei corpi e quello del pareggiamento delle loro temperature? Vien fatto spontaneamente di figurarsi il «flusso» del calore da un corpo all'altro, come il flusso dell'acqua da un livello superiore a uno inferiore. Sebbene primitiva, questa raffigurazione sembra accordarsi con molti fatti, cosicché ne deriva l'analogia:

*Acqua**Calore*

Livello superiore

Temperatura superiore

Livello inferiore

Temperatura inferiore

Il flusso si verifica finché ambo i livelli o ambo le temperature si eguagliano. Questa veduta semplicista risulta utile per taluni accer-

tamenti di ordine quantitativo. Se determinate masse di acqua e di alcol aventi temperature differenti vengono mescolate, basterà conoscere i rispettivi calori specifici per predire la temperatura finale della miscela. Per converso, l'osservazione della temperatura finale e un po' di algebra ci mettono in grado di trovare il rapporto fra i due calori specifici.

Nel concetto di calore, inteso in tal modo, riconosciamo una somiglianza con altri concetti fisici. Così concepito, il calore ci appare quale una sostanza, al pari della massa in meccanica. La quantità di calore può variare o no, come denaro che venga speso o riposto in cassaforte. Finché la cassaforte rimane chiusa a chiave, il denaro ripostovi non varia, così come non variano né la massa, né il calore in un corpo isolato. La bottiglia thermos ideale è analoga a una cassaforte chiusa. Inoltre, così come in un sistema di corpi accuratamente isolati la massa complessiva non varia, ancorché si verifichino trasformazioni chimiche, del pari il calore complessivo si conserva sebbene possa fluire da un corpo a un altro. Anche se il calore non viene usato per innalzare la temperatura di un corpo ma per fondere ghiaccio o per mutare acqua in vapore, possiamo sempre considerarlo come una sostanza integralmente recuperabile ricongelando l'acqua o liquefacendo il vapore. Le antiche espressioni *calore latente* di fusione o di vaporizzazione stanno a provare che tali concetti sono tratti dalla rappresentazione del calore come sostanza. Il calore latente è temporaneamente occulto, similmente a denaro riposto in cassaforte, ma disponibile per chi conosce il segreto della serratura.

Tuttavia il calore non è certamente una sostanza nello stesso senso della massa. La massa si può determinare per mezzo di bilance. Ma il calore? Un pezzo di ferro pesa forse più quando è rovente di quando è ghiacciato? L'esperienza prova di no. Ammesso dunque che il calore sia una sostanza, questa dovrà essere imponderabile. Il «calore sostanza» che ricevette il nome di *calorico*, è la nostra prima conoscenza in seno a tutta una famiglia di sostanze imponderabili. Più oltre avremo occasione di seguire la storia della famiglia e di assistere alla sua ascesa e alla sua decadenza. Per ora, basti prender nota della comparsa di questo suo primo membro.

Qualsiasi teoria fisica ha per obiettivo la spiegazione del maggior numero possibile di fenomeni. Essa si giustifica se e in quanto rie-

sce a farci comprendere gli eventi. Abbiamo visto che la teoria «sostanziale» spiega non pochi fenomeni calorifici. Ma ben presto constateremo che ci troviamo nuovamente in presenza di un indizio falso e che il calore non può venir considerato come una sostanza, ancorché imponderabile. Ciò salta agli occhi, se riflettiamo intorno ad alcune semplicissime esperienze che marcarono i primi albori della civilizzazione.

Una sostanza viene considerata come qualcosa che non può né crearsi né distruggersi. Ma l'uomo primitivo creava, mediante sfregamento, calore a sufficienza per accendere il legno. Gli esempi di produzione di calore mediante frizione sono tanto numerosi e familiari che non occorre rammentarli. In tutti i casi del genere viene creata una certa quantità di calore, fatto di cui è difficile dar ragione con la teoria di una «sostanza calore». Un sostenitore di questa teoria potrebbe bensì tentarne una giustificazione inventando argomenti come questi: «La teoria di una sostanza "calore" può benissimo spiegare l'apparente creazione di calore. Si consideri l'esempio più semplice di due pezzi di legno sfregati l'uno contro l'altro. Lo sfregamento esercita un'influenza sul legno e ne modifica le proprietà. È verosimile che le proprietà si modifichino in modo tale che una stessa quantità di calore produca una maggior temperatura di prima. Dopo tutto, la sola cosa che notiamo è l'aumento di temperatura. È possibilissimo che la frizione modifichi soltanto il calore specifico del legno e non già la quantità totale di calore».

A questo punto sarebbe inutile prolungare la discussione con il sostenitore della teoria «sostanziale», non potendo giungere a un chiarimento se non ricorrendo alla prova sperimentale. Immaginiamo due pezzi di legno identici e supponiamo che in entrambi vengano prodotti uguali cambiamenti di temperatura con metodi diversi: in uno dei pezzi mediante frizione e nell'altro mediante contatto con un radiatore qualsiasi. Se alla nuova temperatura i due pezzi avranno lo stesso calore specifico, l'intera teoria «sostanziale» crollerà. Esistono diversi metodi assai semplici per determinare i calori specifici e la sorte della teoria «sostanziale» dipende per l'appunto da tali misurazioni. Prove, capaci di decidere sulla vita o morte di una teoria, si presentano spesso nella storia della fisica e si chiamano *esperimenti cruciali*. L'importanza cruciale di un espe-

rimento si palesa unicamente dal modo con il quale la questione è impostata e una teoria dei fenomeni e una soltanto può essere messa in tal modo a prova. La determinazione dei calori specifici di due corpi della stessa specie, aventi temperature uguali, prodotte rispettivamente da frizione e da flusso di calore, è l'esempio tipico di un esperimento cruciale. Tale esperimento venne eseguito circa centocinquanta anni fa da Rumford e inferse un colpo mortale alla teoria della «sostanza calore».

Lasciamo parlare Rumford:

Avviene frequentemente che nelle ordinarie faccende e occupazioni della vita si presenti l'occasione di assistere a talune fra le più curiose operazioni della Natura; e spesso potrebbero eseguirsi esperimenti filosofici assai interessanti, praticamente senza fatica e senza spesa, con il solo ausilio del macchinario adibito ai meri scopi meccanici delle arti e manifatture.

Ho spesso avuto occasione di constatarlo e sono persuaso che l'abitudine di tenere gli occhi aperti su tutto ciò che avviene nel corso ordinario delle cose della vita ha condotto – sia per mero accidente, sia in seguito ai voli dell'immaginazione, provocati dall'osservazione delle apparenze più comuni – a utili quesiti e a sensati divisamenti d'indagine e di perfezionamento, assai più spesso che non le più profonde meditazioni dei filosofi durante le ore dedicate allo studio...

Trovandomi recentemente impegnato nel dirigere la foratura di cannoni nelle officine dell'arsenale di Monaco, fui sorpreso dal considerevolissimo grado di calore che in breve tempo, un cannone di ottone acquista con la foratura, nonché dall'ancora più intenso calore (assai superiore a quello dell'acqua bollente, come constatai sperimentalmente) dei trucioli metallici che il trapano separa dal cannone...

Donde proviene il calore effettivamente prodotto durante l'operazione meccanica suddetta?

È esso fornito dai trucioli separati col trapano dalla massa solida del metallo? Se così fosse, allora secondo la moderna dottrina del calore latente e del calorico, la capacità [il calore specifico] dovrebbe risultare non soltanto modificata, ma la modificazione da essi [i trucioli] subita dovrebbe essere abbastanza grande per dar ragione di tutto il calore prodotto.

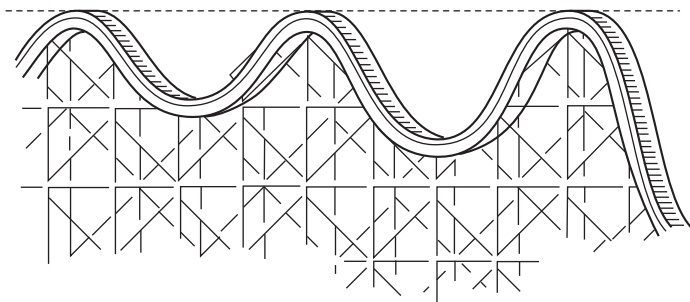
Ma nessuna modificazione del genere si era prodotta, poiché prendendo pesi uguali di questi trucioli e di sottili fettine dello stesso blocco di metallo separate per mezzo di una sega fine, e immergendo gli uni e le altre, alla stessa temperatura (quella dell'acqua bollente), in quantità uguali di acqua fredda (ossia alla temperatura di 59,5 gradi Fahrenheit [ossia 15,3 °C]), accertai che l'acqua nella quale erano immersi i trucioli non appariva né più né meno scaldata di quell'altra, nella quale erano immerse le fettine di metallo.

## Le montagne russe

Analizziamo il moto di quella popolare fonte di emozioni che sono le montagne russe. Un vagoncino viene sollevato o spinto fino al punto più elevato di un binarietto. Quando viene sganciato e lasciato a se stesso, il vagoncino comincia a correre in giù per effetto della gravità e poi seguita a salire e scendere lungo un fantastico tracciato, tutto dislivelli e curve procurando, con i repentini cambiamenti di velocità, una serie di emozioni ai suoi occupanti. Ogni montagna russa ha il suo punto più elevato che è quello in cui il vagoncino viene lasciato libero. Per tutta la durata del suo moto esso non raggiungerà mai più la stessa altezza. La rappresentazione completa di questo moto sarebbe assai complicata. Da un lato abbiamo l'aspetto meccanico del problema, vale a dire le variazioni di velocità e di posizione nel tempo; d'altro lato abbiamo l'aspetto calorifico, ossia la creazione di calore nelle ruote e nelle rotaie, per effetto dell'attrito. A dire il vero, la divisione del processo fra questi due aspetti obbedisce più che altro allo scopo di rendere possibile l'utilizzazione dei concetti precedentemente discussi. Tale divisione conduce a un esperimento ideale, poiché un processo fisico che presenti soltanto l'aspetto meccanico può bensì venir immaginato, ma mai effettuato.

Agli effetti dell'esperimento ideale possiamo immaginare che un tale abbia trovato il modo di eliminare completamente l'attrito, compagno indivisibile del moto. Questo tale decide di applicare la sua invenzione alla costruzione di una montagna russa e comincia a fare delle prove. Supponiamo che il vagoncino inizi la sua corsa da un punto di partenza situato a trenta metri di altezza sul livello del suolo. Provando e riprovando, il nostro inventore constaterà

ben presto che egli deve attenersi a una regola molto semplice: il vagoncino potrà percorrere tutti i tracciati possibili e immaginabili, con l'unica limitazione che nessun punto di essi sia più elevato della stazione di partenza. Affinché il vagoncino possa arrivare liberamente al termine del percorso, questo potrà bensì toccare, quante volte si voglia, l'altezza di trenta metri, però mai superarla. Beninteso, in pratica, un vagoncino non può mai raggiungere l'altezza iniziale, causa l'attrito; ma come premesso, ciò non preoccupa il nostro inventore immaginario.



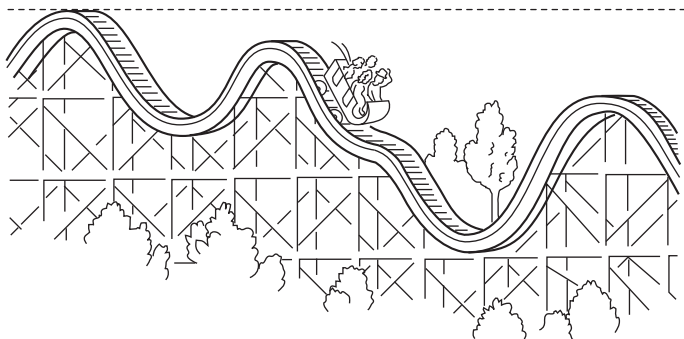
Continuiamo ad attenerci al nostro esperimento ideale che prescinde dall'attrito e seguiamo il moto del vagoncino, dall'istante in cui lascia la stazione di partenza per cominciare a scendere. A misura che esso si muove, la sua distanza dal suolo diminuisce, ma la sua velocità aumenta. Sulle prime, questa proposizione ricorda quelle di una lezione di lingue: «Non ho matite, ma voi avete sei arance». Tuttavia essa non è così stupida. Non c'è nesso fra il mio possesso di una matita e il vostro di sei arance. Esiste invece una effettiva correlazione fra la distanza del vagoncino dal suolo e la sua velocità. Si può benissimo calcolare la velocità del vagoncino in qualsiasi istante, ove si conosca la sua altezza dal suolo. Non entreremo però in maggiori particolari, dato che questi hanno necessariamente carattere quantitativo e che perciò soltanto una formula matematica può esprimerli chiaramente.

Nel punto più alto del suo percorso, il vagoncino ha la velocità zero e si trova a trenta metri dal suolo. Nel punto più basso possibile la distanza dal suolo è nulla e la velocità è massima. Questi fat-



ti possono esprimersi in altri termini, e cioè: Nel punto più alto il vagoncino possiede *energia potenziale*, ma è privo di *energia cinetica* o di moto. Nel punto più basso invece, esso possiede il massimo di energia cinetica, ma nessunissima energia potenziale. In tutte le posizioni intermedie, nelle quali una certa velocità si accompagna a una certa elevazione, il vagoncino possiede a un tempo energia cinetica e potenziale. L'energia potenziale aumenta con l'altezza, mentre l'energia cinetica cresce con l'aumento della velocità. I soli principi della meccanica bastano a spiegare il moto qui considerato. Nella corrispondente formulazione matematica appaiono due espressioni per l'energia, entrambe variabili ma la cui somma non varia. In tal modo i due concetti, quello di energia potenziale, dipendente dalla posizione, e quello di energia cinetica, dipendente dalla velocità, rivestono significato matematico rigoroso. Le due denominazioni sono, beninteso, convenzionali e giustificate soltanto dall'utilità pratica. La somma delle due quantità non varia e viene designata come una *costante del moto*. L'energia totale, e cioè la cinetica più la potenziale, può venir comparata a una somma di denaro il cui valore complessivo non muta, ancorché venga continuamente cambiato da una valuta in un'altra e viceversa, ad esempio da euro a dollari, poi da dollari a euro e così via, ma sempre a uno stesso tasso fisso di cambio.

Anche nelle vere montagne russe, nelle quali l'attrito impedisce al vagoncino di raggiungere la stessa altezza dalla quale è partito, si verifica un continuo scambio fra energia cinetica e potenziale.



Qui però la somma non rimane costante, ma seguita a diminuire. Per contro riscontriamo creazione di calore. Da cui la necessità di un ulteriore passo importante e ardito per giungere alla correlazione fra gli aspetti meccanici e calorifici del moto. Più avanti avremo occasione di constatare l'estrema importanza delle conseguenze e generalizzazioni derivanti da tale passo.

Oltre le due energie, la cinetica e la potenziale, un altro fattore entra dunque ora in gioco, e cioè il calore creato dall'attrito. Corrisponde forse questo calore alla diminuzione dell'energia meccanica, vale a dire, energia cinetica e potenziale prese insieme? Azzardiamo una nuova congettura. Se il calore può venir considerato come una forma di energia, allora forse è la somma dei tre fattori, e cioè calore, energia cinetica ed energia potenziale, che rimane costante. Non è il calore soltanto, bensì l'insieme costituito dal calore e dalle altre forme di energia che si manifesta indistruttibile al pari di una sostanza. È come se qualcuno pagasse a se stesso una commissione in sterline per convertire euro in dollari e viceversa, in modo che economizzando la commissione, l'importo complessivo in euro, dollari e sterline, ai tassi di cambio convenuti, rimanga fisso.

Il progresso scientifico ha demolito il vecchio concetto del calore come sostanza. Noi cerchiamo di creare una nuova specie di sostanza e cioè l'*energia*, una delle cui forme è il calore.

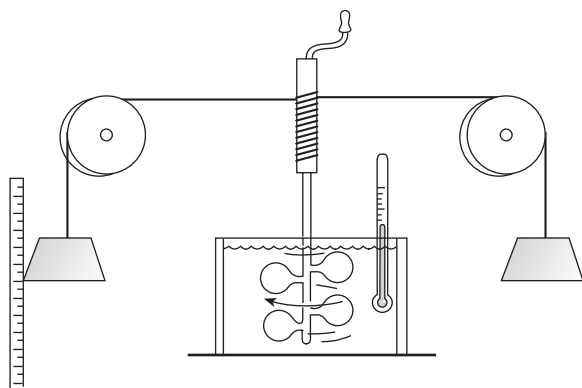
## Il tasso di scambio dell'energia

Poco meno di cento anni fa, il nuovo indizio che condusse al concetto di calore quale forma di energia venne intuito da Mayer e confermato sperimentalmente da Joule. È una strana coincidenza che quasi tutto il lavoro fondamentale concernente la natura del calore sia stato eseguito non già da professionisti, bensì da dilettranti di fisica. Ci furono il versatile scozzese Black, il medico tedesco Mayer e il grande avventuriero americano conte Rumford, che visse a lungo in Europa e fra le cui molteplici attività si annovera anche quella di ministro della Guerra di Baviera. Ci fu infine il birraio inglese Joule che dedicò il suo tempo libero a eseguire esperimenti della massima importanza, concernenti la conservazione dell'energia.

Joule sottomise a verifica sperimentale la congettura secondo cui il calore è una forma di energia e determinò il relativo tasso di scambio. Vale la pena di prendere in esame i risultati cui egli giunse.

L'insieme dell'energia cinetica e potenziale di un sistema costituisce la sua energia meccanica. Nel caso delle montagne russe siamo stati indotti alla congettura che parte dall'energia meccanica si converte in calore. Se ciò è vero deve esserci fra l'una e l'altro, tanto nel caso anzidetto, come in tutti i processi fisici simili, un determinato *tasso di scambio*. Tale questione è puramente quantitativa, ma il fatto che una data quantità di energia meccanica possa venir cambiata in un determinato quantitativo di calore è troppo importante per non considerarlo più da vicino. È infatti del maggior interesse conoscere il numero che esprime il tasso di scambio, vale a dire quanto calore può ricavarsi da una data quantità di energia meccanica.

Le ricerche di Joule portarono precisamente alla determinazione di questo numero. Il meccanismo di uno dei suoi esperimenti somiglia molto a un orologio a pesi. Per caricare un orologio simile s'innalzano due pesi, il che conferisce energia potenziale al sistema. Se dopo ciò l'orologio rimane indisturbato, esso potrà venir considerato come un sistema isolato. A poco a poco i pesi scendono e l'orologio va scaricandosi. Al termine di un certo periodo di tempo i pesi raggiungono il loro punto più basso e l'orologio si ferma. Che cosa è avvenuto dell'energia? L'energia potenziale dei pesi si è mutata in energia cinetica del meccanismo e si è poi gradualmente dissipata come calore.



Una ingegnosa modificazione di questo meccanismo permise a Joule di misurare il calore perduto e pertanto il tasso di scambio fra energia meccanica e calore. Nel suo apparecchio, due pesi facevano girare un mulinello a palette, immerso in acqua. L'energia potenziale dei pesi si mutava in energia cinetica delle parti mobili e quindi in calore che elevava la temperatura dell'acqua. Misurando queste variazioni di temperatura e valendosi del ben noto calore specifico dell'acqua, Joule calcolò la quantità di calore assorbito. Egli riassunse i risultati di molte prove nei termini seguenti:

1) La quantità di calore prodotto dall'attrito dei corpi, siano essi solidi o liquidi, è sempre proporzionale alla quantità di forza [per «forza» Joule intende energia] spesa.

2) La quantità di calore occorrente per elevare di 1 grado Fahrenheit la temperatura di 1 libbra d'acqua (pesata nel vuoto, a temperatura fra 55 e 60 °F) richiede, per la sua produzione, la spesa di una forza [energia] meccanica equivalente alla caduta di 772 libbre per lo spazio di 1 piede.<sup>1</sup>

In altre parole, l'energia potenziale di 772 libbre sollevate di 1 piede dal suolo equivale alla quantità di calore occorrente per innalzare da 55 a 56 gradi Fahrenheit la temperatura di 1 libbra d'acqua. In seguito altri sperimentatori giunsero a risultati un po' più precisi,<sup>2</sup> ma l'equivalente meccanico del calore è fondamentalemente quello determinato da Joule, con il suo lavoro d'avanguardia.

Una volta raggiunto questo importantissimo risultato, gli ulteriori progressi furono rapidi. Venne presto riconosciuto che l'energia meccanica e la calorifica sono soltanto due delle molte forme che l'energia può assumere. Qualsiasi cosa che può venir convertita nell'una o nell'altra è anch'essa una forma di energia. La radiazione emessa dal Sole è energia, poiché parte di essa si trasforma in calore sulla Terra. La corrente elettrica possiede energia, poiché riscalda un filo o fa girare la ruota di un motore. Il carbone rappresenta energia chimica che si libera come calore quando esso brucia. Ogni evento naturale comporta la trasformazione di una forma di energia in un'altra, e sempre a un ben definito tasso di scambio. In un sistema chiuso, cioè isolato da influenze esteriori, l'energia si conserva e pertanto si comporta come una sostanza. In simile sistema la somma di tutte le possibili forme di energie è costante, ancorché le singole qualità possano variare. Se consideriamo l'universo intero come un sistema chiuso possiamo orgogliosamente proclamare, con i fisici del XIX secolo, che l'energia dell'universo è invariabile, e che nessuna sua frazione può venir mai né creata né distrutta.

<sup>1</sup> [È approssimativamente:

1 °F = 0,6 °C

1 libbra = 0,45 kg

55+60 °F = 13 °C

772 libbre = 350 kg

1 piede = 0,305 m.]

<sup>2</sup> [In unità decimali, e in base ai risultati sperimentali sull'equivalente meccanico del calore, oggi diremmo: l'energia potenziale di 0,427 chilogrammi sollevati di 1 metro dal suolo equivale a 1 caloria, cioè alla quantità di calore occorrente per innalzare, a pressione atmosferica normale, da 14,5 a 15,5 gradi Celsius, 0 centigradi, la temperatura di 1 grammo d'acqua.]

In conclusione, i nostri due concetti di *sostanza* sono: *materia* ed *energia*. Entrambi obbediscono a leggi di conservazione: un sistema isolato non può variare né in quanto alla massa, né in quanto all'energia. Ma la materia possiede peso, mentre l'energia ne è priva. Abbiamo così due concetti distinti e due leggi di conservazione. Possono queste idee prendersi ancora sul serio? Questa rappresentazione, in apparenza così ben fondata, non ha forse subito modificazioni alla luce dei più recenti sviluppi? Sì, è così! Le modificazioni subite dai due concetti in questione sono connesse con la teoria della relatività e ce ne occuperemo più avanti.

## Lo sfondo filosofico

I risultati della ricerca scientifica impongono spesso mutamenti nell'interpretazione filosofica di problemi che oltrepassano di molto il ristretto dominio della scienza stessa. Qual è l'obiettivo della scienza? Che cosa si richiede da una teoria, il cui intento è la descrizione della natura? Benché escano dai limiti della fisica, questi quesiti sono ad essa intimamente legati, poiché la scienza fornisce i materiali che li fanno sorgere. È sui risultati scientifici che devono basarsi le generalizzazioni filosofiche. Ma queste, non appena enunciate e largamente accettate, esercitano bene spesso la loro influenza sull'ulteriore sviluppo del pensiero scientifico, imponendo la scelta di un determinato indirizzo fra tutti quelli che si potrebbero seguire. Tale indirizzo prevale finché la ribellione vittoriosa contro le idee accette non conduca a nuovi e inattesi sviluppi, che a loro volta divengono sorgenti di nuovi aspetti filosofici. Queste osservazioni devono necessariamente parere vaghe e inconsistenti, ove non vengano illustrate con esempi tolti dalla storia della fisica.

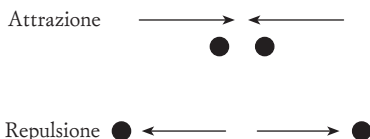
Proveremo, dunque, a tratteggiare le prime idee filosofiche sugli obiettivi della scienza. Queste idee esercitarono un'influenza preponderante fino a circa cento anni fa, allorché la loro reiezione venne imposta da nuove prove, nuovi fatti e nuove teorie che condussero alla formazione di un nuovo sfondo scientifico.

Tutta la storia della scienza, dalla filosofia greca in poi, fino alla fisica moderna, ci palesa il costante intento di ridurre l'apparente complessità dei fenomeni naturali a poche e semplici idee e relazioni fondamentali. Questo è il principio basilare di ogni filosofia naturale. Esso trova già espressione nell'opera degli «atomisti». Ventitré secoli fa, Democrito scriveva:

Per convenzione il dolce è dolce; per convenzione l'amaro è amaro; per convenzione il caldo è caldo; per convenzione il freddo è freddo; per convenzione il colore è colore. Ma in realtà ci sono gli atomi e il vuoto. E cioè, le cose che cadono sotto i sensi sono supposte essere reali ed è abitudine di tenerle per tali; ma in verità non lo sono. Soltanto gli atomi e il vuoto sono reali.

Nella filosofia antica, quest'idea è rimasta allo stato di una ingegnosa trovata dell'immaginazione. Le leggi naturali, coordinatrici della successione dei fenomeni, rimasero ignote ai greci. La scienza collegante teoria ed esperimento, non data realmente che dai lavori di Galileo. Nelle pagine precedenti abbiamo seguito gli indizi che condussero alle leggi del moto. Durante duecento anni di ricerca scientifica, i concetti sui quali appoggiavano tutti i conati, volti a interpretare la natura furono: forza e materia. È impossibile immaginare l'una senza l'altra, poiché *la materia manifesta la propria esistenza, quale sorgente di forza, con la propria azione su altra materia.*

Consideriamo l'esempio più semplice e cioè: due particelle con forze agenti fra di esse. Le forze più facilmente immaginabili sono quelle di attrazione e di repulsione. In entrambi i casi, il vettore di forza giace lungo una linea congiungente i punti materiali. La richiesta di semplicità conduce alla figurazione di particelle che si attraggono o che si respingono mutuamente; ogni altra supposizione sulla direzione delle forze agenti, esigerebbe una rappresentazione molto più complicata. Possiamo fare una supposizione altrettanto semplice sulla lunghezza dei vettori di forza? Anche se vogliamo evitare congetture troppo singolari, dobbiamo ammettere che la forza fra due determinate particelle dipende unicamente dalla loro distanza, come avviene per le forze gravitazionali. Ciò sembra abbastanza semplice. Potremmo infatti immaginare forze molto più complesse, che dipendessero cioè, non soltanto dalla distanza, ma altresì dalla velocità delle due particelle. Comunque, finché materia e forza rimangono i nostri soli concetti fondamentali, non possiamo valerci di congetture più semplici di quelle secondo cui le for-





ze agiscono lungo la linea congiungente le particelle e dipendono unicamente dalla distanza. Ma è veramente possibile descrivere tutti i fenomeni fisici, unicamente mediante forze di tale specie?

Le grandi conquiste della meccanica in tutti i suoi rami, i suoi notevoli successi nello sviluppo dell'astronomia, l'applicazione dei suoi criteri a problemi la cui indole era apparentemente diversa e non meccanica; tutto ciò condusse alla credenza che fosse *effettivamente* possibile descrivere tutti i fenomeni in base a forze semplici, agenti fra particelle inalterabili. Cosciente o incosciente, tale proposito emerge dall'intera creazione scientifica durante due secoli, dal tempo di Galileo in poi. Esso venne esplicitamente enunciato da Helmholtz, verso la metà del XIX secolo:

Pertanto, noi finiamo con lo scoprire che il problema della scienza fisica materiale, è quello di riferire i fenomeni naturali a forze immutabili, di attrazione e di repulsione, le cui intensità dipendono interamente dalla distanza. La risolvibilità di questo problema è la condizione per la completa comprensione della natura.

Secondo Helmholtz, il progresso scientifico avrebbe un indirizzo determinato e seguirebbe strettamente un corso fisso:

E il suo obiettivo sarà raggiunto non appena la riduzione dei fenomeni naturali a forze semplici sarà completa e verrà fornita la prova che tale riduzione è la sola di cui i fenomeni sono suscettibili.

Questa concezione pare opaca e ingenua al fisico del XX secolo. Egli fremerebbe al pensare che la grande avventura dell'indagine scientifica possa prender fine così presto e che una monocorde, se pur infallibile, figurazione dell'universo possa venir stabilita per tutti i tempi a venire.

Benché i capisaldi summenzionati riducano la descrizione di tutti i fenomeni a forze semplici, essi lasciano aperta la questione del come le forze dipendano dalla distanza. È infatti possibile che tale dipendenza differisca a seconda dei fenomeni. Dal punto di vista filosofico, la necessità di ammettere specie diverse di forze per fenomeni diversi è, per certo, poco soddisfacente. Ciò nonostante, il cosiddetto «criterio meccanicistico», formulato con la maggior chiarezza da Helmholtz, assunse, a suo tempo, grande importanza. Lo sviluppo della teoria cinetica della materia è uno dei maggiori

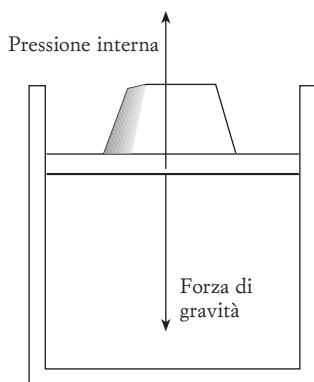
avvenimenti scientifici, realizzatosi sotto l'influenza diretta di detto criterio.

Prima di assistere al declinare dell'interpretazione meccanicistica, accetteremo provvisoriamente il punto di vista condiviso dai fisici del secolo passato, per constatare quali conclusioni possano trarsi dalla loro rappresentazione del mondo esteriore.

## La teoria cinetica della materia

È forse possibile spiegare i fenomeni del calore in termini del moto di particelle interagenti con forze semplici? Prendiamo un recipiente contenente una certa massa di gas – aria, ad esempio – a una certa temperatura. Comunicandole calore, innalziamo la temperatura e accresciamo perciò l'energia del gas. Ma qual è il legame fra questo calore e il moto? La possibile esistenza di un legame è suggerita, sia dal punto di vista filosofico, che abbiamo provvisoriamente adottato, sia dal modo con cui il moto genera calore. Il calore deve essere energia meccanica se tutti i problemi devono essere d'indole meccanica. Scopo della *teoria cinetica* è per l'appunto quello di presentare il concetto di materia sotto tale aspetto. Secondo questa teoria i gas sono aggregati di un enorme numero di particelle o *molecole* che si muovono in tutte le direzioni, urtandosi a vicenda e cambiando la direzione del proprio moto a ogni collisione. Deve esserci perciò una velocità (scalare) media delle molecole, così come in una grande collettività umana si riscontra un'età media e una ricchezza media. Esisterà dunque un'energia cinetica media per ogni particella. Una maggior quantità di calore nel nostro recipiente significa una maggior energia cinetica media. Pertanto, secondo questa rappresentazione, *il calore* non è già una forma di energia speciale e diversa dall'energia meccanica, ma è *propriamente l'energia cinetica del moto molecolare*. A ogni determinata temperatura corrisponde una determinata energia cinetica media per molecola. Questa non è affatto una congettura arbitraria. Se vogliamo farci una rappresentazione meccanica della materia che sia coerente, non possiamo fare a meno di considerare l'energia cinetica di una molecola come una misura della temperatura del gas.

Questa teoria non è un mero gioco della fantasia. Si può dimostrare che la teoria cinetica dei gas, non soltanto concorda con l'esperimento, ma conduce altresì a una comprensione più profonda dei fatti. Ciò può venir illustrato con alcuni esempi.



Prendiamo un recipiente chiuso superiormente da un pistone, libero di muoversi in senso verticale e portante dei pesi. Il recipiente contiene un certo quantitativo di gas che terremo a temperatura costante. Se inizialmente il pistone è a riposo, in una data posizione, esso potrà venir mosso verso l'alto togliendo dei pesi o verso il basso aggiungendone. Per spingere il pistone in basso occorre impiegare una certa forza che agisce contro la pressione interna del gas. Qual è, secondo la teoria cinetica, il meccanismo di questa pressione interna? Un enorme numero di particelle, costituenti il gas, si muovono in tutte le direzioni. Esse bombardano le pareti e il pistone, rimbalzando come palle lanciate contro un muro. Questo continuo bombardamento, effettuato da un grandissimo numero di particelle, mantiene il pistone a una certa altezza opponendosi alla forza di gravità che attira verso il basso il pistone e i pesi sovrapposti. In un senso abbiamo la forza di gravità che è costante, e nel senso opposto i numerosissimi urti irregolari delle molecole. Affinché possa esservi equilibrio, bisogna che l'effetto complessivo di tutte le piccole forze irregolari, agenti sul pistone, sia uguale alla forza di gravità.

Supponiamo ora che – sempre mantenendo la temperatura invariata – il pistone venga spinto verso il basso, in modo da comprimere il gas e da ridurne il volume a una frazione dell'originario, diciamo metà. Che cosa possiamo aspettarci che avvenga, secondo la teoria cinetica? La forza dovuta al bombardamento sarà più efficace di prima, o meno? Le particelle sono ora stipate più fittamente. Benché l'energia cinetica media sia la stessa, le collisioni fra particelle e pistone si verificheranno ora con maggior frequenza. La forza sarà, pertanto, maggiore. È evidente che secondo questa raffigurazione offertaci dalla teoria cinetica, occorrerà un maggior peso per mantenere il pistone nella posizione inferiore. Questo semplice fatto sperimentale è notissimo, ma la sua predizione scende logicamente dalla rappresentazione cinetica della materia.

Consideriamo un altro caso. Prendiamo due recipienti identici contenenti volumi uguali di gas diversi, diciamo idrogeno e azoto, entrambi alla stessa temperatura. Supporremo che i recipienti siano chiusi da pistoni portanti pesi uguali. Ciò significa che i due gas possiedono volumi, temperature e pressioni uguali. La temperatura essendo la stessa anche l'energia cinetica media è – in conformità alla teoria – la stessa. E poiché le pressioni sono uguali, i due pistoni sono bombardati con forze complessive uguali. In media ogni particella è dotata di uguale energia e i volumi dei due gas sono uguali. Ne segue che anche il numero delle molecole dei due gas deve essere uguale, ancorché essi siano chimicamente differenti. Questo risultato è della massima importanza per la comprensione di molti fenomeni chimici. Esso significa che il numero delle molecole in un dato volume e a data temperatura e pressione costituisce una caratteristica non soltanto di un singolo gas, bensì di tutti i gas. È sorprendente che la teoria cinetica possa non solo predire l'esistenza di simile numero universale, ma altresì determinarlo. Torneremo su questo punto, quanto prima.

La teoria cinetica della materia spiega, sia quantitativamente, sia qualitativamente le leggi dei gas desunte dalle prove sperimentali. Inoltre la teoria non si applica soltanto ai gas, ancorché essa abbia registrato i suoi maggiori successi in tale ambito. Un gas può venir liquefatto mediante riduzione della temperatura. Una caduta nella temperatura della materia significa una diminuzione dell'energia cinetica media delle sue particelle. È senz'altro chiaro che l'ener-

gia cinetica media di una particella liquida è inferiore a quella della corrispondente particella gassosa.

Una sorprendente manifestazione del moto di particelle nei liquidi si ebbe, per la prima volta, con il cosiddetto *movimento browniano*, un importante fenomeno che, senza la teoria cinetica della materia, rimarrebbe assolutamente misterioso e incomprensibile. Esso fu osservato per la prima volta dal botanico Brown e venne spiegato ottanta anni dopo, al principio del xx secolo. L'unico apparecchio occorrente per studiare il movimento browniano è un microscopio, anche non molto buono.

Brown stava lavorando con granuli di polline di talune piante, ossia:

particelle o granuli d'insolite dimensioni, la cui lunghezza variava fra un quattromillesimo e un cinquemillesimo, circa, di pollice (da 6 a 5 millesimi di millimetro).

Egli continua:

Esaminando la forma di queste particelle immerse nell'acqua mi accorsi che molte di esse si trovavano in moto... Questi movimenti erano tali da convincermi, dopo ripetute osservazioni, che essi non potevano essere causati né da correnti nel fluido, né dalla sua graduale evaporazione, ma che dovevano appartenere alle particelle stesse.

Ciò che Brown osservava era l'incessante agitazione dei granuli sospesi in acqua, visibile al microscopio. È uno spettacolo impressionante!

La scelta di speciali piante è forse essenziale per il fenomeno? Brown rispose all'interrogativo ripetendo l'esperimento con i pollini di una grande varietà di piante e constatò che tutti i granuli sospesi in acqua esibivano lo stesso moto, purché fossero abbastanza piccoli. Egli riscontrò inoltre la stessa specie d'incessante e irregolare movimento con minutissime particelle di sostanze non soltanto organiche ma anche inorganiche. Il fenomeno si manifestò perfino con un frammento di sfige finemente polverizzato!

Come può spiegarsi questo movimento? Esso sembra in contraddizione con tutta l'esperienza anteriore. La disamina delle posizioni successive occupate da una particella ogni trenta secondi circa, rivela la fantastica forma del suo percorso. Tuttavia la cosa più stupefacente è il carattere manifestamente eterno del movimento. Un pen-

dolo oscillante, immerso nell'acqua si arresta ben presto se non è soccorso da una forza esterna. L'esistenza di un moto che non s'indebolisce mai, sembra contrastare con ogni esperienza. Questo enigma venne brillantemente chiarito dalla teoria cinetica della materia.

Guardando nell'acqua, anche con i più potenti microscopi, non riusciamo a distinguere né le molecole, né il loro moto così come viene rappresentato dalla teoria cinetica della materia. Dobbiamo inferirne che se la teoria considerante l'acqua come un aggregato di particelle, è corretta, le dimensioni delle particelle stesse devono essere inferiori ai limiti di visibilità dei migliori microscopi. Continuiamo ciò malgrado ad appoggiarci alla teoria cinetica e ad ammettere che essa ci offra una raffigurazione coerente della realtà. Le particelle browniane visibili al microscopio vengono bombardate da quelle molto più piccole di cui si compone l'acqua. Il movimento browniano si verifica sempre che le particelle bombardate siano abbastanza piccole. Il movimento si produce perché il bombardamento non è uniforme su tutti i lati e non può venir compensato per motivo del suo carattere irregolare e casuale. Il moto osservabile è dunque il risultato di un moto invisibile. Il comportamento delle particelle immerse rispecchia, fino a un certo punto, quello delle molecole d'acqua e ne costituisce, per così dire, un ingrandimento tale da renderlo visibile al microscopio. Il carattere irregolare e accidentale del percorso delle particelle browniane rispecchia un'analoga irregolarità nel percorso delle particelle più piccole costituenti la materia del liquido. È perciò plausibile che uno studio quantitativo del movimento browniano ci offra una più profonda comprensione della teoria cinetica della materia. È chiaro che il movimento browniano visibile dipende dalla dimensione delle molecole bombardanti. Il movimento browniano non esisterebbe affatto se le molecole bombardanti non possedessero una certa dose di energia, o in altre parole se non possedessero massa e velocità. Non fa perciò meraviglia che lo studio del movimento browniano conduca alla determinazione della massa di una molecola.

Attraverso laboriose indagini, sia teoriche che sperimentali, si poté creare la struttura quantitativa della teoria cinetica. Uno degli indizi che condussero a risultati quantitativi fu il fenomeno browniano. Ma gli stessi risultati possono raggiungersi anche per altre vie, seguendo indizi del tutto diversi. Il fatto che metodi differenti

confermino le stesse conclusioni è della maggior importanza, poiché esso attesta l'intima coerenza della teoria cinetica della materia.

Ci limiteremo a menzionare soltanto uno dei molti e stupefacenti dati quantitativi accertati con l'esperimento e con la teoria. Supponiamo di avere un grammo del più leggero degli elementi e cioè d'idrogeno e domandiamoci: quante particelle ci sono nel grammo? La risposta varrà non soltanto per l'idrogeno, ma anche per tutti gli altri gas, dato che le condizioni necessarie affinché due gas possiedano lo stesso numero di particelle ci sono già note.

La teoria ci mette in grado di rispondere al quesito, partendo da talune misurazioni del movimento browniano di un corpuscolo in sospensione. La risposta è un numero di grandezza sbalorditiva; un tre, seguito da ventitré altre cifre. Il numero di molecole in un grammo d'idrogeno è

303 000 000 000 000 000 000 000.

Figuriamoci che le dimensioni delle molecole di un grammo di idrogeno aumentino tanto, quanto basta per vederle con l'aiuto di un microscopio, o più precisamente che il loro diametro raggiunga 5 millesimi di millimetro, come quello di una particella browniana. In tal caso per stiparle le une accanto alle altre, occorrerebbe uno scatolone cubico di circa quattrocento metri di lato.

La massa di una molecola d'idrogeno è presto calcolata; basta dividere 1 per il numero testé citato. Il risultato è un numero di piccolezza fantastica:

0,00000000000000000000000033 grammi.

Questo è dunque il numero che rappresenta la massa di una molecola d'idrogeno!

Gli esperimenti sul movimento browniano appartengono a una soltanto delle varie categorie di esperienze che conducono per vie del tutto indipendenti alla determinazione di questo numero, di così grande importanza in fisica.

Nella teoria cinetica della materia e in tutti gli importanti risultati da essa raggiunti riconosciamo la realizzazione del programma filosofico generale, secondo cui la spiegazione di tutti i fenomeni si riduce all'interazione fra particelle materiali.



## Riassumiamo

La meccanica ci consente di predire esattamente il futuro della traiettoria di un corpo in movimento, nonché di dischiuderne il passato, sempre che la posizione attuale del corpo stesso e le forze che agiscono su di esso siano note. Così ad esempio, possono prevedersi le traiettorie future di tutti i pianeti. In questo caso le forze agenti sono le forze gravitazionali di Newton, dipendenti unicamente dalle distanze. Gli incontestabili successi della meccanica classica suggeriscono che l'interpretazione meccanicistica può coerentemente estendersi a ogni ramo della fisica e che tutti i fenomeni possono spiegarsi con le azioni di forze, consistenti in attrazioni o repulsioni, dipendenti unicamente dalla distanza e agenti su particelle immutabili.

Con la teoria cinetica della materia, vediamo come tale interpretazione, derivante da problemi d'ordine meccanico, si estenda ai fenomeni calorifici e conduca a una rappresentazione della struttura della materia, che ha registrato notevoli successi.



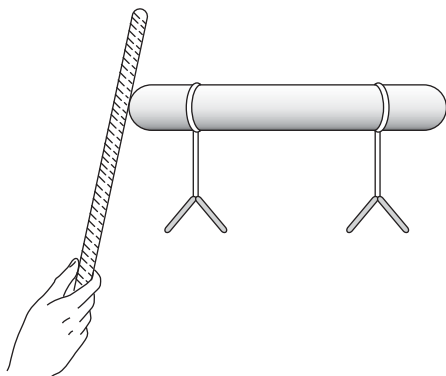
*Parte seconda*

Decadenza dell'interpretazione meccanicistica



## I due fluidi elettrici

Le pagine seguenti contengono il resoconto poco attraente di alcuni esperimenti assai semplici. Resoconto noioso, non soltanto perché la descrizione di esperimenti offre scarso interesse in confronto alla loro esecuzione, ma anche perché il loro significato non emerge che dalla teoria. Intendiamo però additare un esempio tipico del compito che nella fisica spetta alla teoria.



1) Una verga metallica sostenuta da un piede di vetro porta a ognuna delle due estremità un elettroscopio, sospeso a un filo metallico. Che cos'è un elettroscopio? È un apparecchio semplicissimo consistente essenzialmente in due sottilissime foglioline d'oro, pendenti da un'asticciola metallica. L'apparecchio è protetto da un involucro di vetro e l'asticciola metallica è in contatto soltanto con corpi non metallici, cosiddetti isolanti.

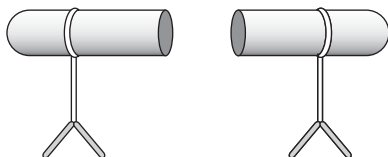
Oltre che degli elettroscopi e della verga metallica ci muniremo di una bacchetta di gomma dura e di un pezzo di flanella.

L'esperimento si effettua come segue: osserveremo anzitutto se le foglioline dell'elettroscopio sono in posizione normale, vale a dire se pendono una accanto all'altra. Se per caso ciò non fosse, basterà toccare la verga metallica con un dito, per riunirle. Ciò fatto, strofineremo vigorosamente la bacchetta di gomma con la flanella e quindi la porteremo a contatto con la verga metallica. Vedremo allora le foglioline divergere immediatamente e continuare a divergere anche dopo allontanata la bacchetta.

2) Procediamo a un secondo esperimento, servendoci degli stessi mezzi e cominciando col curare che le foglioline dell'elettroscopio pendano l'una accanto all'altra. Questa volta però non porteremo la bacchetta di gomma strofinata a contatto diretto con la verga metallica, ma l'avvicineremo soltanto. Le foglioline divergeranno nuovamente, ma allorché allontaneremo la bacchetta, senza aver toccato la verga, esse invece di continuare a divergere, come nel caso precedente, ricadranno subito in posizione normale.

3) Modifichiamo di poco l'apparecchio, per procedere a una terza esperienza. Adoperiamo una verga metallica composta di due parti disgiungibili. Strofiniamo la bacchetta di gomma e avviciniamola alla verga. Si manifesterà lo stesso fenomeno di prima: le foglioline divergeranno. Ma se ora disgiungiamo le due parti della verga e se dopo ciò allontaniamo la bacchetta di gomma, constateremo che le foglioline continuano a divergere, invece di ricadere in posizione normale, come nel secondo esperimento.

È difficile interessarsi intensamente a questi esperimenti semplici e banali. Chi li avesse eseguiti nel Medioevo sarebbe stato probabilmente condannato; a noi sembrano soltanto poco attraenti e illogici. E sarebbe difficile, dopo averne letto la descrizione una sola volta, ripeterli senza confondersi. Soltanto una certa dose di



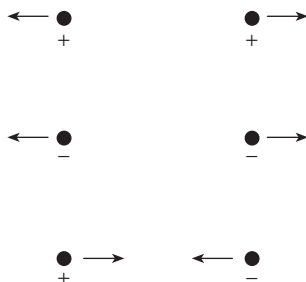
teoria può renderli intellegibili. Possiamo anzi dire di più: non è presumibile che esperimenti simili possano improvvisarsi; è indispensabile che siano preceduti da idee più o meno precise sul loro significato.

Accenneremo ora alle idee sulle quali si basa una teoria semplice e ingenua che spiega tutti i fatti suesposti.

Esistono due *fluidi elettrici*, l'uno è denominato *positivo* (+), l'altro *negativo* (-). Essi hanno in certo qual modo il carattere di una sostanza, nel senso già indicato in un precedente capitolo e cioè: quantitativamente sono bensì suscettibili di aumento o di diminuzione, ma in un sistema isolato il loro totale non varia. C'è tuttavia una differenza essenziale fra il caso attuale e quelli del calore, della materia o dell'energia. Non abbiamo una sostanza elettrica soltanto, ne abbiamo due. Non si può perciò ricorrere qui, come precedentemente, all'analogia della moneta, senza generalizzarla in qualche modo. Un corpo è elettricamente neutro se i fluidi elettrici, il positivo e il negativo, si annullano reciprocamente. Un uomo è nullatenente o perché non possiede realmente nulla, oppure perché la somma di denaro che ha in cassa è esattamente uguale alla somma dei suoi debiti. Le scritture di debito e di credito nei suoi registri possono paragonarsi alle due specie di fluidi elettrici.

Un'altra supposizione della teoria è che due fluidi elettrici della stessa specie si respingono, mentre due fluidi di specie opposte si attirano. Ciò può venir rappresentato graficamente come nella figura seguente.

Occorre infine fare anche la seguente supposizione teorica: esistono due specie di corpi, quelli nei quali i fluidi elettrici possono muo-



versi liberamente, e quelli nei quali non possono farlo. I primi vengono detti *conduttori*, i secondi *isolanti*. Come sempre succede in casi simili, questa distinzione non va presa alla lettera. Il conduttore o l'isolante ideale sono finzioni che non possono mai realizzarsi. I metalli, la Terra, il corpo umano sono esempi di conduttori, benché non tutti ugualmente buoni. Il vetro, la gomma, la porcellana e simili sono isolanti. L'aria è un cattivo isolante come sanno tutti coloro che hanno assistito agli esperimenti appena descritti. È infatti un pretesto assai comodo quello di attribuire il cattivo risultato degli esperimenti elettrostatici all'umidità che accresce la conduttività dell'aria.

Queste supposizioni teoriche sono sufficienti per spiegare i tre esperimenti descritti. Prenderemo a discuterli, nello stesso ordine, alla luce della teoria dei fluidi elettrici.

1) La bacchetta di gomma, come tutti gli altri corpi in condizioni normali, è elettricamente neutra. Essa contiene i due fluidi, il positivo e il negativo, in quantità uguali. Strofinando con la flanella noi li separiamo. Questa affermazione è meramente convenzionale. Essa non è infatti che l'applicazione al processo dello strofinamento della terminologia creata dalla teoria. La specie di elettricità che la bacchetta di gomma, dopo lo strofinamento, possiede in eccesso è quella che, con termine indubbiamente convenzionale, denominiamo negativa. Se gli esperimenti fossero stati eseguiti con una bacchetta di vetro, strofinata con una pelle di gatto, il fluido in eccesso, giusta la convenzione stabilita, avremmo dovuto chiamarlo positivo. Ma continuiamo l'esperimento. Toccando la verga con la gomma strofinata, le apportiamo del fluido elettrico. Esso vi si muove liberamente espandendosi sull'intera superficie metallica, comprese le foglioline d'oro. Poiché l'elettricità negativa respinge l'elettricità di stesso nome, le due foglioline si scostano il più possibile l'una dall'altra e il risultato è la divergenza osservabile. Il metallo riposa su un sostegno fatto di vetro o di qualche altra sostanza isolante, cosicché il fluido permane sul conduttore fino a quando la conduttività dell'aria lo consente. Comprendiamo ora perché prima di cominciare l'esperimento occorra toccare il metallo. In tal caso metallo, corpo umano e Terra vengono a costituire un unico immenso conduttore, nel quale il fluido elettrico si diluisce a un punto tale che praticamente non ne resta più sull'elettroscopio.



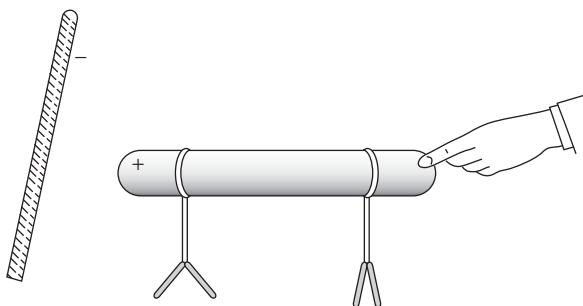
2) Si comincia l'esperimento allo stesso modo come il precedente. Ma invece di portare la gomma strofinata a contatto con il metallo, l'avviciniamo a breve distanza. In tal caso non c'è passaggio di elettricità dalla gomma al metallo. Ma i due fluidi che nel conduttore possono muoversi liberamente, si separano, e il positivo viene attirato dalla bacchetta, mentre il negativo viene respinto. Essi tornano a mescolarsi quando allontaniamo la bacchetta, perché i fluidi di specie opposta si attirano mutuamente.

3) Nel terzo esperimento la verga metallica è divisa in due parti. Perciò quando allontaniamo la bacchetta di gomma i due fluidi non possono mescolarsi e le foglioline d'oro, conservando un eccesso di uno dei fluidi elettrici, continuano a divergere.

Alla luce di questa teoria assai semplice, tutti i fatti menzionati fin qui appaiono comprensibili. La teoria stessa ci permette inoltre d'intendere molti altri fatti nel dominio della *elettrostatica*.

Lo scopo di qualsiasi teoria è quello di orientarci verso fatti nuovi, di suggerire nuovi esperimenti e di condurre alla scoperta di nuovi fenomeni e di nuove leggi. Nel nostro caso ciò può venir messo in evidenza con un esempio. Modifichiamo il secondo esperimento nel modo seguente: teniamo la bacchetta di gomma vicina a una delle estremità della verga metallica e tocchiamo l'altra estremità con il dito. Che succederà?

La teoria ci dice: il fluido respinto (-) può ora fuggire attraverso il corpo umano con la conseguenza che rimane un solo fluido nella verga, e cioè il positivo. In tali condizioni soltanto le foglioline dell'elettroscopio vicino alla bacchetta di gomma potranno continuare a divergere. L'esperimento conferma la previsione.



Dal punto di vista della fisica moderna la teoria appena esposta appare ingenua e inadeguata. Serve però d'esempio per mostrare quali siano i tratti caratteristici di ogni teoria fisica.

Nella scienza non esistono teorie eterne. Presto o tardi taluni fatti previsti dalla teoria vengono refutati dall'esperimento. Ogni teoria ha il suo periodo di sviluppo graduale e di trionfo, dopo di che può anche subire un rapido declino. Ascesa e caduta della teoria del «calore sostanza», precedentemente discussa, ne sono un esempio. Casi analoghi, più gravi e importanti, saranno esaminati più avanti. Nella scienza quasi tutti i grandi progressi nascono dalla crisi di una teoria invecchiata e dagli sforzi fatti per trovare una via d'uscita di fronte alle difficoltà emergenti. Ancorché appartengano al passato dobbiamo esaminare idee e teorie antiche, poiché questo è il solo mezzo per bene intendere l'importanza delle nuove e l'estensione della loro validità.

Nelle prime pagine di questo libro abbiamo paragonato la funzione del ricercatore a quella del detective che dopo aver riunito i fatti necessari trova la soluzione giusta con il solo ausilio del pensiero. C'è tuttavia un punto essenziale rispetto al quale il nostro paragone appare assai superficiale. Tanto nella vita, quanto nel romanzo giallo il delitto è un fatto acquisito. Il detective deve bensì cercare lettere, impronte digitali, pallottole e armi, ma sa positivamente che un delitto è stato commesso. Lo scienziato si trova in tutt'altra situazione. Non è difficile immaginare qualcuno che non possieda nozione alcuna in fatto di elettricità, come gli antichi i quali, non per questo, hanno vissuto meno felicemente. Diamo al nostro qualcuno una verga metallica, delle foglie d'oro, dei fiaschi di vetro, una bacchetta di gomma indurita, un pezzo di flanella, in breve, tutto il materiale occorrente per eseguire le nostre tre esperienze. Può darsi che il nostro qualcuno sia istruitissimo, ma è probabile che verserà del vino nei fiaschi, e che si servirà della flanella per far pulizia, senza mai concepire l'idea di procedere agli esperimenti descritti sopra. Per il detective il delitto è un fatto positivo e il problema si pone semplicemente in questi termini: chi è l'uccisore? Lo scienziato invece deve, almeno in parte, commettere egli stesso il delitto e al contempo condurre l'inchiesta. Inoltre il suo compito non è quello di spiegare un caso speciale, bensì tutti i fenomeni che si sono prodotti o che potrebbero ancora prodursi.

L'introduzione del concetto dei fluidi ci mostra l'influenza delle idee meccanicistiche, le quali cercano di spiegare tutto mediante sostanze e forze interagenti. Per accertare se il punto di vista meccanicistico possa venire applicato alla descrizione dei fenomeni elettrici, dobbiamo considerare il problema seguente. Siano date due piccole sfere elettricamente cariche, vale a dire che possiedono un eccesso di uno dei fluidi elettrici. Sappiamo che le due sfere si attireranno o si respingeranno. Ma la forza dipende forse dalla distanza? e se è così, in che modo ne dipende? La congettura più semplice sembra essere che questa forza dipende dalla distanza, allo stesso modo come la forza di gravitazione, la quale si riduce, per esempio, alla nona parte della sua intensità se la distanza aumenta di tre volte. Gli esperimenti di Coulomb hanno mostrato che tale legge è effettivamente valida. Un secolo dopo la scoperta della legge sulla gravitazione, dovuta a Newton, una dipendenza analoga fra le forze elettriche e la distanza venne trovata da Coulomb. Le differenze principali fra la legge di Newton e quella di Coulomb sono le seguenti: l'attrazione della gravitazione è presente ovunque, mentre le forze elettriche esistono soltanto se i corpi possiedono delle cariche elettriche. Nella gravitazione non esiste che l'attrazione, mentre le forze elettriche possono attirarsi o respingersi.

Qui sorge lo stesso quesito che abbiamo esaminato a proposito del calore. Sono i fluidi elettrici delle sostanze imponderabili o no? In altri termini, il peso di un pezzo di metallo è forse il medesimo sia quando è elettricamente carico, sia quando è neutro? Con la bilancia non si constata alcuna differenza di peso. Ne deduciamo che anche i fluidi elettrici fanno parte della famiglia delle sostanze imponderabili.

Per poter ulteriormente progredire, la teoria dell'elettricità richiede l'introduzione di due nuovi concetti. Vogliamo nuovamente evitare le definizioni rigorose e servirci di concetti aventi analogia con altri che ci sono già familiari. Rammentiamo quanto fosse essenziale, per bene intendere i fenomeni calorifici, distinguere fra calore e temperatura. Nel caso presente è altrettanto importante distinguere fra il potenziale elettrico e la carica elettrica. La differenza fra questi due concetti è resa chiara dall'analogia seguente:

Potenziale elettrico	- Temperatura.
Carica elettrica	- Calore.

Due conduttori, per esempio due sfere di grandezza diversa, possono avere la stessa carica elettrica, vale a dire lo stesso eccesso d'uno dei fluidi elettrici, ma il potenziale rispettivo sarà diverso: maggiore per la sfera più piccola e minore per la sfera più grande. Il fluido elettrico possiederà maggior densità e sarà perciò più stipato sul conduttore più piccolo. Dovendo la forza di repulsione aumentare con la densità, la tendenza della carica a sfuggire sarà maggiore per la piccola sfera che per la grande. Questa tendenza della carica a sfuggire da un conduttore fornisce una misura diretta del suo potenziale. Per mostrare chiaramente la differenza fra la carica e il potenziale formuleremo alcune proposizioni descriventi il comportamento di corpi riscaldati e le confronteremo con le corrispondenti proposizioni sul comportamento di conduttori carichi.

### *Calore*

Due corpi aventi inizialmente temperature differenti, finiscono per trovarsi alla stessa temperatura, qualche tempo dopo essere stati messi in contatto.

Quantità uguali di calore producono cambiamenti di temperatura differenti in due corpi, le cui capacità termiche siano differenti.

Un termometro a contatto di un corpo indica – con l'altezza della colonna di mercurio – la propria temperatura e pertanto quella del corpo.

### *Elettricità*

Due conduttori isolati aventi inizialmente potenziali elettrici differenti, si trovano rapidamente allo stesso potenziale, allorché sono messi in contatto.

Quantità uguali di carica elettrica producono cambiamenti differenti del potenziale elettrico in due corpi le cui capacità elettriche siano differenti.

Un elettroscopio a contatto con un conduttore indica – con la divergenza delle foglie d'oro – il proprio potenziale elettrico e pertanto quello del conduttore.

Questa analogia non va tuttavia spinta troppo oltre. Un esempio metterà in luce tanto le differenze quanto le somiglianze. Se un corpo caldo è portato a contatto di un corpo freddo, il calore passa dal primo al secondo. Supponiamo, ora, di avere due conduttori isolati, le cui cariche siano uguali in quantità ma di segno opposto. Essi avranno allora potenziali differenti, poiché per convenzione il potenziale di una carica negativa viene considerato come inferiore a quello numericamente uguale della carica positiva. Se i due conduttori vengono messi a contatto o allacciati da un filo metallico, essi, in conformità alla teoria dei fluidi elettrici, non manifesteran-

no nessuna carica e pertanto nessuna differenza di potenziale. Dobbiamo dunque immaginare un «flusso» di carica elettrica fra un conduttore e l'altro, durante il breve lasso di tempo in cui la differenza di potenziale si eguaglia. Ma in che modo? È il fluido positivo che fluisce verso il corpo di carica negativa, oppure il fluido negativo che fluisce verso il corpo di carica positiva?



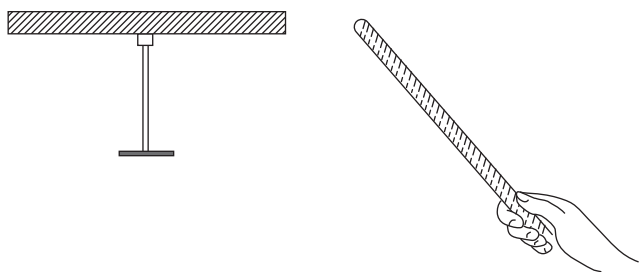
Nelle nozioni utilizzate fin qui, non troviamo nessuna base per optare fra queste due alternative. Possiamo scegliere l'una e l'altra delle due possibilità, o anche supporre che il flusso si verifichi simultaneamente in entrambi i sensi. Ci troviamo qui su terreno meramente convenzionale, senza poter attribuire nessun significato alla nostra scelta, poiché non conosciamo nessun metodo per decidere la questione sperimentalmente. Sviluppi ulteriori, che hanno condotto a una teoria dell'elettricità molto più profonda, hanno anche fornito la risposta al problema, il quale è assolutamente privo di senso se formulato in termini della semplice e primitiva teoria dei fluidi elettrici.

Per ora ci limiteremo a esprimerci come segue: il fluido elettrico scorre dal conduttore a potenziale più elevato, verso quello a più basso potenziale. Nel caso dei nostri due conduttori, l'elettricità fluisce da quello di carica positiva verso quello di carica negativa. Questo enunciato è meramente convenzionale e totalmente arbitrario. La difficoltà incontrata sta a provare che l'analogia fra calore ed elettricità è tutt'altro che perfetta.

Abbiamo visto che è possibile applicare il criterio meccanicistico alla descrizione dei fatti elementari dell'elettrostatica. Altrettanto può dirsi dei fenomeni magnetici.

## I fluidi magnetici

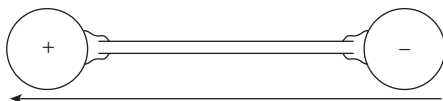
Procederemo, come abbiamo fatto finora, partendo da fatti molto semplici e cercandone poi una spiegazione teorica.



1) Ci serviremo di due calamite di ferro lineari; una delle quali sospesa liberamente al centro e l'altra tenuta in mano. Se le estremità delle due calamite vengono sufficientemente avvicinate si constaterà una forte attrazione fra di loro. Ciò si verifica sempre. Se non si verificasse attrazione non ci sarebbe che da capovolgere la calamita che teniamo in mano. Fra due calamite l'interazione è sempre possibile. Le estremità delle calamite si chiamano *poli*. Proseguendo l'esperimento conduciamo il polo della calamita che teniamo in mano lungo l'altra calamita. Si constata che l'attrazione va diminuendo e che non si manifesta più forza alcuna quando il polo perviene al punto di mezzo della calamita sospesa. Se continuiamo a condurre il polo nello stesso senso, si osserva una repulsione che raggiunge la sua maggior intensità all'altro polo della calamita sospesa.

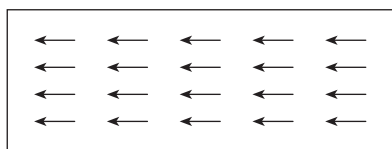
2) L'esperienza precedente ne suggerisce una seconda. Ogni calamita presenta due poli. È forse possibile isolarne uno? Viene subito un'idea molto semplice: basterà spezzare la calamita in due parti uguali. Abbiamo visto che nessuna forza si manifesta fra il polo di una calamita e il punto mediano dell'altra. Ma quando si spezza realmente una calamita, il risultato è inatteso e sorprendente. Ripetendo con la metà della calamita sospesa, l'esperienza di cui al numero 1, i risultati sono esattamente gli stessi di prima, cosicché nel punto in cui anteriormente alla rottura non si constatava la minima traccia di forza magnetica, troviamo ora un forte polo magnetico.

Come dobbiamo spiegare questi fatti? Possiamo cercare di modellare una teoria del magnetismo su quella dei fluidi elettrici. Ciò ci viene suggerito dalla circostanza che qui, come nei fenomeni elettrostatici, abbiamo attrazione e repulsione. Immaginiamo dunque due conduttori sferici aventi cariche uguali, l'una positiva e l'altra negativa. Cariche «uguali» significa qui che esse hanno gli stessi valori assoluti;  $+5$  e  $-5$ , ad esempio, hanno lo stesso valore assoluto. Supponiamo altresì che le due sfere siano unite mediante un isolante, che potrebbe essere una bacchetta di vetro. Questo dispositivo che schematicamente può venir rappresentato da una freccia diretta dal conduttore di carica negativa verso il conduttore di carica positiva, lo chiameremo un *dipolo elettrico*. È senz'altro evidente che due dipoli del genere si comporteranno esattamente come le barrette magnetiche dell'esperimento 1. Se ora consideriamo la nostra trovata come un modello di una vera calamita e se supponiamo inoltre l'esistenza di fluidi magnetici, potremo dire che una calamita non è altro che un *dipolo magnetico*, avente alle sue estremità due fluidi di specie differenti. Questa teoria semplice, ricalcata su quella dell'elettricità, è sufficiente per spiegare il primo esperimento. Deve infatti esserci attrazione a una estremità, repulsione all'altra ed equilibrio al centro, ove le forze sono uguali e opposte. Ma la seconda esperienza? Spezzando la bacchetta di vetro



del nostro dipolo elettrico otteniamo due poli isolati. Ciò dovrebbe verificarsi anche con la barretta o dipolo magnetico, il che è in opposizione con il secondo esperimento. Questa contraddizione ci obbliga a escogitare una teoria più sottile.

In luogo del nostro precedente modello possiamo immaginare che una calamita sia costituita da tanti piccoli dipoli magnetici elementari che non possono venir ulteriormente spezzati in due poli separati. In tal caso nella calamita, considerata come un tutto, regna l'ordine, poiché tutti i dipoli elementari sono orientati nello stesso senso. Si capisce allora perché spezzando una calamita, due nuovi poli appaiono alle nuove estremità e perché questa teoria più raffinata spieghi non soltanto i fatti dell'esperimento 1, ma anche quelli dell'esperimento 2.



La teoria più semplice basta già a spiegare molti fatti. Citiamo un esempio. Sappiamo che le calamite attirano i pezzetti di ferro. Perché? In un pezzo di ferro comune i due fluidi magnetici sono mescolati cosicché non può constatarsi nessun effetto definitivo. Ma se allo stesso pezzo di ferro avviciniamo un polo positivo, questo agisce come un «ordine di separazione» impartito ai fluidi, attirando quello negativo e respingendo al contempo il positivo. Ne consegue un'attrazione fra il ferro e la calamita. Allontanando la calamita i fluidi ritornano più o meno nelle loro condizioni primitive, a seconda della loro capacità di ricordare l'ordine impartito dalla forza esterna.

Resta poco da dire circa il lato quantitativo del problema. Con due sbarre magnetiche molto lunghe possiamo determinare il grado di attrazione (o di repulsione) dei loro poli, allorché vengono avvicinati. Se le sbarre sono abbastanza lunghe, l'effetto delle estremità più lontane sarà trascurabile. In qual modo attrazione o repulsione dipendono dalla distanza fra i poli? La risposta data dagli experi-



menti di Coulomb è che la dipendenza dalla distanza è la stessa come quella enunciata dalla legge di gravitazione di Newton e dalla legge di Coulomb per le cariche elettriche.

Nella teoria magnetica vediamo nuovamente l'applicazione del solito punto di vista generale, e cioè la tendenza a descrivere tutti i fenomeni per mezzo di forze di attrazione e di repulsione, dipendenti unicamente dalla distanza e agenti fra particelle invariabili.

Va ancora menzionato un fatto assai noto, poiché avremo occasione di servircene più avanti. La Terra è un grande dipolo magnetico. Non si ha la più lontana spiegazione del perché sia così. Il Polo Nord è approssimativamente il polo magnetico negativo (−) e il Polo Sud, il polo magnetico positivo (+) della Terra. Le denominazioni di positivo e negativo sono meramente convenzionali, ma una volta stabilite ci permettono di designare i poli in qualsiasi altro caso. Un ago calamitato, mobile intorno a un asse verticale, obbedisce al comando della forza magnetica della Terra, dirigendo il suo polo positivo verso il Polo Nord, vale a dire verso il polo magnetico negativo della Terra.

Benché ai fenomeni elettrici e magnetici trattati finora possa applicarsi costantemente il punto di vista meccanicistico, non c'è di che trarne motivo di fiera e di soddisfazione. Taluni tratti della teoria sono infatti poco soddisfacenti, per non dire scoraggianti. Abbiamo dovuto inventare nuove specie di sostanze: due fluidi elettrici e i dipoli magnetici elementari. La quantità delle sostanze imponderabili comincia a diventare preoccupante.

Le forze sono semplici: le forze della gravitazione, le forze elettriche e quelle magnetiche possono tutte venir rappresentate allo stesso modo. Ma il prezzo pagato per questa semplicità è elevato; esso consiste nell'introduzione di nuove sostanze imponderabili, ossia di concetti piuttosto artificiosi e senza rapporto con la sostanza fondamentale: la massa.

## La prima grave difficoltà

Siamo ormai in grado di prendere in esame la prima grave difficoltà che incontra l'applicazione del nostro punto di vista filosofico generale. Vedremo più avanti come questa difficoltà, insieme a un'altra ancora più seria, rovinò la convinzione che tutti i fenomeni possano spiegarsi con il criterio meccanicistico.

L'enorme sviluppo dell'elettricità quale ramo della scienza e della tecnica ebbe inizio con la scoperta della corrente. Nella storia della scienza è questo uno dei pochi esempi in cui il caso ebbe parte preponderante. L'aneddoto della convulsione di una gamba di rana viene raccontato in più modi. Ma prescindendo dalla veridicità dei dettagli è certo che la scoperta accidentale di Galvani condusse Volta a costruire, verso la fine del XVIII secolo, la cosiddetta *pila voltaica*. Questa non ha più nessuna applicazione, ma offre tuttora alle dimostrazioni e ai testi scolastici un esempio molto semplice di una sorgente di corrente.

Il principio della sua costruzione è semplice. Essa si compone di un certo numero di coppe di vetro contenenti acqua mista a poco acido solforico. In ogni coppa due piastre metalliche, una di rame e l'altra di zinco, sono immerse nella soluzione. La piastra di rame di ogni coppa è congiunta con lo zinco della seguente, in modo che soltanto la piastra di zinco della prima e la piastra di rame dell'ultima non sono congiunte. Sempre che gli elementi costituenti la pila e cioè coppa di vetro e paio di piastre siano in numero sufficiente, potremo, mediante un elettroscopio abbastanza sensibile, constatare una differenza di potenziale elettrico fra il rame della prima coppa e lo zinco dell'ultima.

È soltanto allo scopo di ottenere un effetto facilmente misurabile che occorre una pila composta di parecchi elementi. Ai fini della discussione del fenomeno un solo elemento basterebbe. Il potenziale del rame risulta più elevato di quello dello zinco. «Più elevato» è usato qui nello stesso senso secondo cui  $+2$  è maggiore di  $-2$ . Ponendo un conduttore in contatto con la piastra di rame libera e un altro con lo zinco, entrambi i conduttori si caricano, il primo positivamente e il secondo negativamente. Fin qui non constatiamo nulla di nuovo o di notevole e possiamo tentare di applicare le idee che ci sono già familiari in fatto di differenze di potenziale. Abbiamo visto che una differenza di potenziale fra due conduttori viene rapidamente annullata se li congiungiamo mediante un filo metallico, producendo così un flusso di fluido elettrico da un conduttore all'altro. Tale processo è analogo a quello del pareggiamento delle temperature per flusso di calore. Ma si applica forse tutto ciò anche a una pila voltaica? Nella sua relazione, Volta dichiarò che le piastre si comportano come conduttori

debolmente carichi, che agiscono incessantemente, ossia in modo che la loro carica si ristabilisce da sé dopo ogni scarica; che, in una parola, forniscono una carica illimitata, ovvero provocano una azione o propulsione perpetua del fluido elettrico.

Ciò che sorprende in questo esperimento è che la differenza di potenziale fra piastra di rame e piastra di zinco non svanisce, come succede con due conduttori carichi che vengano congiunti con un filo. La differenza permane e perciò in base alla teoria dei fluidi, essa deve dar luogo a un flusso permanente del fluido elettrico dal livello potenziale superiore (piastra di rame) a quello inferiore (piastra di zinco). Per salvare la teoria dei fluidi potremmo ricorrere alla supposizione che qualche forza costante agisca in modo tale da rigenerare la differenza di potenziale e da mantenere così il flusso del fluido elettrico. Ma ciò non toglie che il fenomeno nel suo complesso appaia assai sorprendente dal punto di vista energetico. Una notevole quantità di calore si manifesta nel filo conduttore della corrente, al punto da fonderlo se esso è sottile. Assistiamo dunque alla creazione di energia nel filo, sotto forma di calore. Ma l'intera pila voltaica costituisce un sistema isolato, giacché non vi è nessun

apporto di energia dal di fuori. Se vogliamo attenerci alle leggi della conservazione dell'energia dobbiamo scoprire dove avviene la trasformazione e a spese di che cosa c'è creazione di calore. Non è difficile rendersi conto che nella pila si producono processi chimici complessi, processi ai quali il rame, lo zinco e il liquido nel quale sono immersi prendono parte attiva. Dal punto di vista energetico, la catena delle trasformazioni che si producono è la seguente: energia chimica  $\rightarrow$  energia del fluido elettrico in moto, vale a dire, della corrente  $\rightarrow$  calore. Una pila voltaica non dura eternamente; dopo un certo tempo essa è resa inservibile dai processi chimici associati al flusso dell'elettricità.

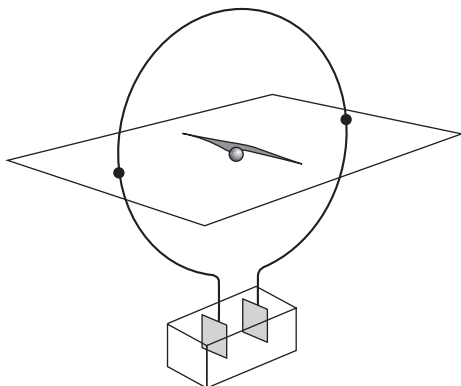
Passiamo ora all'esperimento che mise in evidenza le difficoltà che s'incontrano nell'applicazione dei criteri meccanicistici. Esso parrà certamente strano a chiunque ne senta parlare per la prima volta. Lo eseguì Oersted circa 120 anni fa. Egli così si esprime:

Mediante questi esperimenti sembra dimostrato che l'ago magnetico venne rimosso dalla sua posizione, con l'ausilio di un apparecchio galvanico e precisamente allorché il circuito era chiuso e non già quando era aperto, come venne invano tentato da alcuni celeberrimi fisici, qualche anno fa.

Prendiamo una pila voltaica e un filo conduttore. Se il filo viene allacciato alla piastra di rame e non a quella di zinco esisterà bensì una differenza di potenziale, ma non potrà esservi corrente. Pieghiamo ora il filo a forma di cerchio e collochiamo al centro un ago magnetico, in modo che filo e ago giacciono nello stesso piano. Nulla avviene finché il filo non tocca la piastra di zinco.

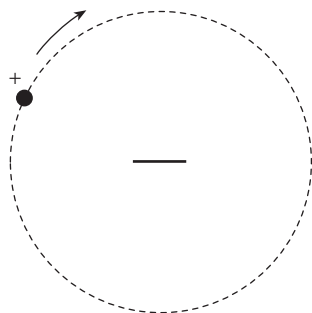
Nessuna forza agisce, poiché la differenza di potenziale esistente non ha influenza sulla posizione dell'ago. È quindi difficile capire perché i «celeberrimi fisici», come li chiama Oersted, si aspettavano di constatare tale influenza.

Congiungiamo ora il filo alla piastra di zinco. Si produrrà immediatamente un fatto strano. L'ago magnetico girerà intorno al suo appoggio e cambierà di posizione. Uno dei suoi poli rimarrà rivolto verso il lettore, ove si supponga che la pagina di questo libro rappresenti il piano del cerchio. L'effetto è quello di una forza agente sul polo magnetico in senso *perpendicolare* al piano del cerchio. I fatti sono così evidenti che si deve inevitabilmente giungere a tale conclusione circa la direzione della forza agente.



Questo esperimento è assai interessante; anzitutto perché rivela una relazione tra fenomeni apparentemente diversi: magnetismo e corrente elettrica. Ma l'interesse maggiore deriva da un'altra circostanza. La forza agente fra il polo magnetico e le piccole porzioni del filo attraverso cui passa la corrente non può giacere lungo linee congiungenti il filo e l'ago, ovvero tra le particelle del fluido elettrico in moto nel filo e i dipoli magnetici elementari dell'ago. La forza è perpendicolare a queste linee di congiunzione! Per la prima volta ci troviamo in presenza di una forza completamente diversa da quella cui volevamo ricondurre tutte le azioni del mondo esterno, in base al nostro punto di vista meccanicistico. Non dimentichiamo infatti che le forze della gravitazione, dell'elettrostatica e del magnetismo obbediscono alle leggi di Newton e di Coulomb e agiscono lungo la linea di congiunzione di due corpi che si attirano o si respingono.

Questa difficoltà ricevette maggior risalto in seguito a un esperimento eseguito con grande abilità da Rowland, una sessantina di anni fa. Evitando di entrare in particolari tecnici, questo esperimento può descriversi come segue: Immaginiamo una piccola sferetta carica. Immaginiamo inoltre che essa si muova celermente lungo un cerchio, al cui centro trovasi un ago magnetico. L'esperimento si basa sullo stesso principio di quello di Oersted e l'unica differenza consiste nel fatto che, in luogo di una ordinaria corrente elettri-



ca, abbiamo una carica elettrica mossa meccanicamente. Rowland constatò che il risultato è simile a quello che si osserva allorché la corrente fluisce in un filo circolare. Il magnete viene deflesso da una forza perpendicolare.

Proviamo ora a imprimere maggior velocità alla carica. Ne risulta un aumento della forza agente sul polo magnetico; la deflessione dell'ago dalla posizione iniziale è ora maggiore. Questa constatazione trae con sé un'ulteriore complicazione: non soltanto la forza *non* giace sulla linea congiungente carica e magnete, ma l'intensità della forza stessa dipende dalla velocità della carica. L'intero punto di vista meccanicistico si basava sulla convinzione che tutti i fenomeni possono spiegarsi mediante forze dipendenti unicamente dalla distanza e non dalla velocità. Il risultato dell'esperimento di Rowland scuote indubbiamente tale convinzione. Ciò nonostante potremmo adottare un atteggiamento conservatore e cercare una soluzione entro la cerchia delle vecchie idee.

Difficoltà di tal genere, improvvisi e inattesi ostacoli lungo la via del trionfo di una teoria sorgono di frequente nella scienza. Una semplice generalizzazione di vecchie idee può talvolta offrire, almeno temporaneamente, una via d'uscita. Nel caso presente, ad esempio, potrebbe parere sufficiente ampliare il punto di vista meccanicistico ammettendo che le forze agenti fra particelle elementari siano di carattere più complesso. Ma sovente risulta impossibile rappezzare una vecchia teoria, e le difficoltà incontrate finiscono per condurre alla sua caduta e al sorgere di nuove vedute. Nel nostro

caso non fu soltanto il comportamento di un piccolo ago magnetico a demolire l'interpretazione meccanicistica, malgrado la solida apparenza delle sue basi e dei suoi successi. Un altro attacco, ben più vigoroso, venne da un angolo visuale del tutto diverso. Ma questa è un'altra storia e la racconteremo più avanti.

## La velocità della luce

Nelle *Due nuove scienze*, Galileo ci fa assistere a una conversazione del maestro con due suoi discepoli sul tema della velocità della luce.

SAGREDO Ma quale e quanta doviamo noi stimare che sia questa velocità del lume? forse istantanea, momentanea, o pur, come gli altri movimenti temporanea? né potremo con esperienza assicurarci qual essa sia?

SIMPLICIO Mostra l'esperienza quotidiana, l'espansion del lume esser istantanea; mentre che vedendo in gran lontananza sparar una artiglieria, lo splendor della fiamma senza interposizion di tempo si produce a gli occhi nostri, ma non già il suono all'orecchie, se non dopo notabile intervallo di tempo.

SAGREDO Eh, signor Simplicio, da codesta notissima esperienza non si raccoglie altro se non che il suono si conduce al nostro udito in tempo men breve di quello che si conduce il lume; ma non mi assicura se la venuta del lume sia perciò istantanea, più che temporanea, ma velocissima...

SALVIATI La poca concludenza di queste e di altre simili osservazioni mi fece una volta pensare a qualche modo di poterci senza errore accertar, se l'illuminazione, cioè se l'espansion del lume fusse veramente istantanea...

Salviati continua spiegando il suo metodo sperimentale. Per meglio intendere la sua idea, immaginiamo che la velocità della luce sia non soltanto finita, ma anche piccola; che cioè il moto della luce venga frenato, analogamente al rallentamento di un film. Due uomini *A* e *B*, muniti ognuno di una lanterna, si piazzano alla distanza di tre chilometri l'uno dall'altro. Il primo di essi, *A*, scopre la sua lanterna. Come prestabilito, *B*, scopre a sua volta la propria lanterna non appena scorge la luce di *A*. Ammettiamo che con il «moto rallentato» da noi supposto, la luce percorra tre chilometri al secondo. In tal caso, il segnale inviato da *A*, sarà visto un secondo dopo da *B*, che, come convenuto, risponderà subito. Il segnale di *B* verrà



pertanto ricevuto da *A* due secondi dopo l'invio del proprio. Se infatti la luce percorre tre chilometri al secondo, saranno trascorsi due secondi fra l'invio e il ricevimento del segnale da parte di *A*, posto che *B* si trovi tre chilometri lontano. Pur di essere sicuro che il suo compagno proceda come prestabilito, *A*, osservando che l'apertura della lanterna di *B* avviene due secondi dopo l'apertura della propria, dovrà giungere alla conclusione che la luce percorre tre chilometri al secondo.

Con la tecnica sperimentale dei suoi tempi, Galileo non aveva nessuna probabilità di riuscire a misurare la velocità della luce nel modo da lui escogitato. Operando sulla distanza di tre chilometri egli avrebbe dovuto poter distinguere intervalli di tempo dell'ordine di un centomillesimo di secondo!

Galileo non risolse il problema di determinare la velocità della luce, ma lo impostò. L'impostazione di un problema è spesso più importante della sua soluzione, che talvolta si riduce a una mera questione di abilità matematica o sperimentale. Porre nuovi quesiti, additare nuove possibilità, considerare vecchi problemi sotto un nuovo angolo visuale, è ciò che realmente richiede immaginazione creativa e che marca il vero progresso scientifico. Il principio d'inertzia e la legge della conservazione dell'energia sono conquiste dovute a nuovi e originali modi di pensare su esperimenti e fenomeni noti da tempo. Non pochi casi analoghi, i quali porranno in rilievo l'importanza di considerare da nuovi punti di vista fatti già noti, ci si presenteranno nelle restanti pagine di questo libro che trattano di nuove teorie.

Tornando al compito relativamente semplice di misurare la velocità della luce, è sorprendente come Galileo non si sia reso conto che il suo esperimento poteva venir realizzato molto più semplicemente e accuratamente da un solo operatore. Invece di piazzare un compagno a distanza, egli avrebbe potuto sostituirlo con uno specchio che non appena ricevuto il segnale, lo avrebbe subito rinviato.

Circa 250 anni più tardi, questo semplicissimo principio venne applicato da Fizeau che fu il primo a determinare la velocità della luce con un esperimento terrestre. Benché meno esattamente, Rømer l'aveva misurata molto prima, mediante osservazioni astronomiche.

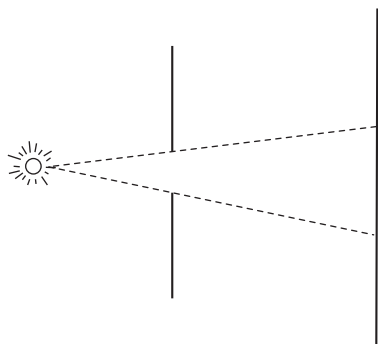
È evidente che, causa la sua enorme grandezza, la velocità della luce poteva venir misurata soltanto in base a una distanza come quel-

la che intercorre fra la Terra e un altro pianeta del sistema solare, oppure con l'ausilio di una tecnica sperimentale molto raffinata. Il primo metodo fu quello seguito da Rømer, il secondo quello adottato da Fizeau. Dall'epoca di questi primi esperimenti, l'importantissimo numero rappresentante la velocità della luce è stato determinato molte volte, con precisione sempre maggiore. Al principio del secolo in corso, un procedimento tecnicamente raffinatissimo venne escogitato allo stesso fine da Michelson. Da questi esperimenti risulta che la velocità della luce nel vuoto è di circa 300 000 chilometri al secondo.

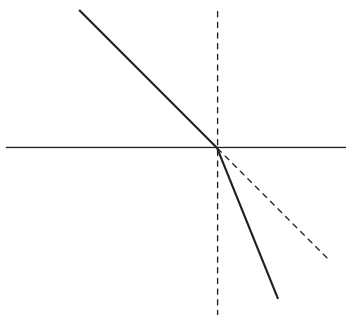
## La luce come sostanza

Partiremo nuovamente da alcuni fatti sperimentali. Il numero testé citato si riferisce alla velocità della luce *in vacuo*. È con questa velocità che la luce, se indisturbata, attraversa lo spazio vuoto. Anche dopo aver estratto l'aria da un recipiente di vetro, seguitiamo a vedere attraverso di esso. Vediamo pianeti, stelle e nebulose, benché la luce percorra immensi spazi vuoti prima di giungere ai nostri occhi. Il fatto che si possa vedere attraverso un recipiente di vetro, tanto se contiene, come se non contiene aria, basta a dimostrare che la presenza dell'aria conta molto poco. Per tale motivo gli esperimenti ottici possono eseguirsi in una stanza qualunque, con gli stessi risultati come se l'aria non ci fosse.

Uno dei fatti ottici più elementari è che la luce si propaga in linea retta. Un esperimento rudimentale lo dimostra. Collochiamo uno schermo munito di un foro davanti a una sorgente luminosa puntiforme. S'intende per tale una piccolissima sorgente lumi-



nosa, come ad esempio una minuscola apertura in una lanterna chiusa. Su una parete, situata a una certa distanza dallo schermo, l'apertura nel medesimo ci apparirà come un'area luminosa, nettamente delimitata, sopra uno sfondo scuro. Il disegno che precede mostra in qual modo questo fatto si ricollega alla propagazione rettilinea della luce.

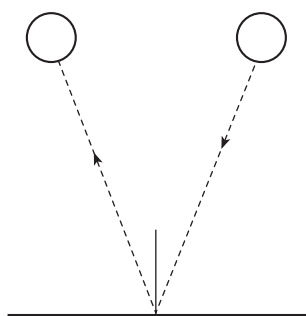


Tutti i fenomeni simili, anche nei casi più complicati nei quali abbiamo a che fare con luci, ombre e penombre possono spiegarsi ammettendo che la luce attraversi il vuoto o l'aria in linea retta.

Esaminiamo ora un altro caso, quello cioè in cui la luce attraversa la materia. Consideriamo un raggio luminoso che, dopo aver attraversato il vuoto o l'aria, cada sopra una grossa lastra di vetro. Che cosa accadrà? Se la legge del moto rettilineo fosse valida anche in tale caso, il percorso della luce nel vetro dovrebbe essere quello della linea tratteggiata. Ma così non è; il percorso subisce una rottura come mostra il disegno. Ciò che osserviamo qui è il fenomeno denominato *rifrazione*. Il ben noto aspetto di un bastone che, immerso nell'acqua, sembra piegato, è una delle tante manifestazioni della rifrazione.

Questi fatti bastano a giustificare l'escogitazione di una teoria meccanica della luce, ed è così che le idee di sostanza, di particelle e di forze sono penetrate nel campo dell'ottica. Ma come vedremo in seguito, questo antico punto di vista filosofico venne poi abbandonato. Si deve però riconoscere che l'interpretazione meccanicistica dei fatti summenzionati si presenta alla mente come semplice e ovvia. Ammettiamo dunque provvisoriamente che tutti i corpi

luminosi emettano particelle di luce o corpuscoli, i quali colpendo i nostri occhi, creano la sensazione della luce. Siamo già tanto abituati a introdurre nuove sostanze, ove ciò sia necessario per una spiegazione meccanicistica, che possiamo farlo una volta di più, senza esitare. Questi corpuscoli dovranno attraversare lo spazio in linea retta, con la velocità che ci è già nota, portandoci così messaggi dei corpi che emettono luce. Tutti i fenomeni palesanti la propagazione rettilinea della luce vengono in appoggio della teoria corpuscolare, poiché tale specie di moto è quella attribuita ai corpuscoli.



Anche la riflessione della luce prodotta dagli specchi viene spiegata dalla teoria corpuscolare assai semplicemente e per analogia con quanto si osserva nell'esperimento meccanico di palle elastiche lanciate contro una superficie solida e piana. Il disegno ce lo mostra.

La spiegazione della rifrazione è alquanto più complicata. Tuttavia la possibilità di una rappresentazione meccanica è manifesta, anche senza entrare in tutti i dettagli. Se ad esempio dei corpuscoli di luce colpiscono una superficie di vetro, è plausibile che subiscano gli effetti di una forza esercitata su di essi dalle particelle materiali, ancorché possa sembrare strano che tale forza agisca soltanto nelle immediate vicinanze della materia. Come già sappiamo, ogni forza agente su una particella in movimento ne modifica la velocità. Riducendo la forza esercitata sui corpuscoli luminosi a un'attrazione perpendicolare alla superficie del vetro, il moto risultante seguirà

una via intermedia fra la direzione originale e la perpendicolare. Questa spiegazione così semplice sembra foriera di successo per la teoria corpuscolare della luce. Tuttavia, ai fini di accertare l'utilità e il grado di validità della teoria, dobbiamo esaminare altri fatti assai più complessi.

## L'enigma del colore

Fu ancora il genio di Newton a spiegare per la prima volta la dovizia dei colori del mondo. Ecco la descrizione di uno dei suoi esperimenti, nelle sue proprie parole:

Nel 1666, anno nel quale mi applicai a tagliare vetri ottici di forma diversa dalla sferica, preparai un prisma triangolare allo scopo di sperimentare intorno ai famosi fenomeni del colore. E avendo a tale intento fatto buio nella mia stanza e praticato un foro nello sportello della finestra per lasciare passare una conveniente quantità di luce solare, collocai il mio prisma ove essa entrava, in modo che potesse venir rifratta sulla parete opposta. Fu per me una vera gioia il poter contemplare i vividi e intensi colori così ottenuti.

La luce solare è *bianca*; ma dopo il passaggio attraverso un prisma essa esibisce tutti i colori esistenti nel mondo visibile. La natura ottiene lo stesso risultato coll'incantevole sfoggio di colori dell'arcobaleno. I tentativi per spiegare questo fenomeno risalgono ai tempi più remoti. Il racconto biblico secondo cui l'arcobaleno è il suggello di Dio a un patto con gli uomini è in certo qual modo una «teoria». Ma non spiega soddisfacentemente perché l'arcobaleno si riproduca così spesso e sempre in relazione con la pioggia. Il complesso rompicapo del colore venne abordato scientificamente per la prima volta nella grande opera di Newton, che ne indicò anche la soluzione.

Un margine dell'arcobaleno è sempre rosso e l'altro violetto. Fra i due sono disposti tutti gli altri colori. Newton spiega questo fenomeno ammettendo che tutti i colori siano già presenti nella luce bianca, per cui questa consisterebbe in una miscela di altrettante specie diverse di corpuscoli, quanti sono i diversi colori. Essi traversano lo spazio interplanetario e l'atmosfera all'unisono, producendo così l'effetto della luce bianca; ma si separano allorché pas-

sano per un prisma come quello di Newton. Secondo la teoria meccanica la rifrazione è dovuta, come abbiamo visto, a forze che risiedono nelle particelle vetrose e agiscono sui corpuscoli di luce. Queste forze devono presumersi differenti a seconda dei differenti corpuscoli, le più intense agendo sul violetto e le più deboli sul rosso. Perciò ogni colore viene rifratto in misura diversa ed esce dal prisma separato dagli altri. Nel caso dell'arcobaleno, gocce d'acqua assumono le funzioni del prisma.

Tutto ciò contribuisce a complicare la teoria della luce *sostanza*. Non abbiamo più un'unica *sostanza luce*, ma diverse sostanze, una per ogni colore. Se però la teoria ha qualche fondamento, devono potersene trarre conseguenze convalidabili con l'osservazione.

La serie dei colori componenti la luce solare bianca, rivelata dall'esperimento di Newton, è denominata *spettro solare* o più precisamente *spettro visibile*. La divisione della luce solare nei suoi componenti si chiama *dispersione* della luce. Se la spiegazione fornita non è errata, i colori separati nello spettro devono potersi riunire, mediante un secondo prisma opportunamente disposto. Il nuovo processo dovrà essere esattamente l'inverso del precedente; dovremo cioè ottenere luce bianca dai colori precedentemente separati. Newton dimostrò sperimentalmente che è infatti possibile ottenere luce bianca dallo spettro di questa e di nuovo lo spettro dalla luce bianca, con lo stesso semplicissimo procedimento e quante volte si voglia.

Questi esperimenti diedero valido appoggio alla teoria secondo cui i corpuscoli appartenenti a ogni singolo colore si comportano come sostanze inalterabili. Newton scrisse:

i quali colori non vengono generati, ma soltanto resi visibili con la loro separazione, poiché ove siano nuovamente mescolati e ricongiunti essi ricompongono il medesimo colore come prima della separazione. Per la stessa ragione le trasmutazioni prodotte dall'unione di diversi colori non sono reali, poiché se i nuovi raggi così ottenuti vengono nuovamente separati, essi tornano a esibire esattamente i medesimi colori come prima della composizione; così come si verifica con finissime polveri blu e gialle, le quali, bene mescolate, appaiono verdi all'occhio nudo, ancorché i colori delle particelle componenti non risultino trasmutati, ma soltanto mescolati. Infatti con l'ausilio di un buon microscopio potranno scorgersi ancora le particelle blu e gialle mischiate insieme.

Supponiamo ora di isolare una fine striscia dello spettro. Ciò vuol dire che avremo lasciato passare soltanto un colore attraverso la stret-



ta fenditura di uno schermo, mediante il quale tutti gli altri colori vengono intercettati. Il fascio di raggi che riesce a passare è composto di *luce omogenea*, vale a dire luce che non può venir ulteriormente suddivisa in componenti. È questa una conseguenza della teoria ed è facile provarla sperimentalmente. Non è infatti possibile scomporre ulteriormente un simile fascio di colore unico. Esistono diversi mezzi per procurarsi sorgenti di luce omogenea. Il sodio, ad esempio, portato all'incandescenza, emette luce gialla omogenea. Com'è facile intendere, in molti casi conviene eseguire esperimenti ottici con luce omogenea, giacché i risultati osservati saranno più semplici.

Immaginiamo che, a un tratto, avvenga una cosa assai strana e cioè che il Sole cominci a emettere soltanto luce omogenea di un determinato colore: mettiamo giallo. La grande varietà di colori del nostro globo svanirebbe immediatamente. Ogni cosa sarebbe o gialla o nera! Questa predizione è una conseguenza della teoria secondo cui la luce è una sostanza, poiché nuovi colori non possono venir creati. È facile ottenerne la conferma sperimentale. In una stanza nella quale l'unica sorgente di luce è il sodio incandescente, tutto è giallo o nero. La dovizia dei colori nel mondo è il riflesso della varietà dei componenti colorati della luce bianca.

La teoria della «luce sostanza» funziona egregiamente in tutti i suddetti casi, ancorché la necessità di ammettere altrettante sostanze quanti sono i colori, ci lasci alquanto perplessi. Anche l'ipotesi che tutti i corpuscoli di luce abbiano esattamente la stessa velocità nello spazio vuoto sembra assai strana.

È immaginabile che un altro ordine di supposizioni, una teoria di carattere completamente diverso, possa funzionare altrettanto bene e fornire tutte le spiegazioni volute. Tra poco avremo infatti occasione di veder sorgere un'altra teoria, basata su concetti del tutto diversi e, ciò nonostante, suscettibile di spiegare la stessa serie di fenomeni ottici. Prima però di esporre le premesse sulle quali questa nuova teoria è basata, dobbiamo rispondere a un quesito che non ha nulla a che fare con le precedenti considerazioni ottiche. Dobbiamo tornare alla meccanica e chiederci: Che cosa è un'onda?

Che cos'è un'onda?

Un pettegolezzo nato a Roma raggiunge Milano assai presto, ancorché nessuna delle persone partecipanti alla sua diffusione viaggi fra le due città. Due specie diverse di moto sono qui coinvolte: il moto Roma-Milano del pettegolezzo e il moto delle persone che lo hanno diffuso. Il vento passando su un campo di frumento produce un'onda che si propaga attraverso l'intero campo. Anche in tal caso dobbiamo distinguere fra il moto dell'onda e il moto delle singole piante, le quali effettuano soltanto piccole oscillazioni. Tutti conoscono le onde che si propagano in cerchi sempre più larghi, allorché un sasso cade in acqua tranquilla. Il moto dell'onda è del tutto diverso da quello delle particelle d'acqua le quali si muovono soltanto su e giù. *Il moto dell'onda* che vediamo propagarsi alla superficie dell'acqua è *quello di uno stato della materia* e non già quello della materia stessa. Un turacciolo galleggiante sull'onda lo prova chiaramente, poiché esso non fa che ciondolare su e giù obbedendo al moto effettivo dell'acqua, invece di allontanarsi trasportato dall'onda.

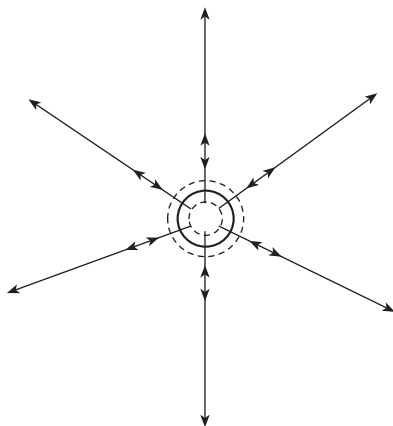
Per meglio comprendere il meccanismo dell'onda ricorriamo nuovamente a un esperimento ideale. Supponiamo che un vasto spazio sia riempito uniformemente con acqua, aria o qualsiasi altro *mezzo fluido*. Supponiamo inoltre che pressappoco nel centro ci sia una sfera. Da principio nulla si muove. A un tratto la sfera comincia a respirare o pulsare ritmicamente, dilatandosi e contraendosi, variando cioè di volume, ma conservando la forma sferica. Che cosa accadrà nel mezzo circostante? Consideriamo anzitutto il momento in cui la sfera comincia a dilatarsi. Le particelle del mezzo, situate nelle immediate vicinanze della sfera, vengono spinte in fuori,

in modo che si forma un involucro sferico di acqua o di aria o d'altro, la cui densità è superiore alla normale. Similmente, quando la sfera si contrae, lo strato del mezzo che la circonda più da vicino subisce una diminuzione di densità. Queste variazioni di densità si propagano attraverso l'intero mezzo. Il moto delle particelle costituenti il mezzo consiste soltanto in piccole vibrazioni, mentre il moto generale è quello di un'onda che avanza progressivamente. La novità essenziale, che per la prima volta abbiamo qui l'occasione di considerare, è *il moto di qualche cosa che non è materia, bensì energia, propagata attraverso la materia*.

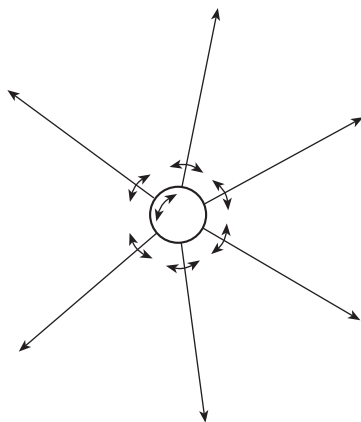
Basandoci sull'esempio della sfera pulsante, possiamo introdurre due concetti fisici d'indole generale, assai importanti per la caratterizzazione delle onde. Il primo di tali concetti è quello di *velocità di propagazione dell'onda*, velocità che dipende dal mezzo e che è diversa, secondo che ad esempio si tratti di acqua o di aria. Il secondo concetto è quello di *lunghezza d'onda*. Nel caso delle onde che si osservano in mare o su un fiume, la lunghezza d'onda è la distanza che separa il solco o la cresta di un'onda, dal solco o dalla cresta dell'onda seguente. Così le onde del mare hanno una lunghezza d'onda maggiore di quella delle onde di un fiume. Nel caso nostro e cioè di onde prodotte da una sfera pulsante, la lunghezza d'onda è la distanza, in un dato istante, fra due involucri vicini aventi massimi o minimi di densità. È evidente che questa distanza non può dipendere dal mezzo soltanto. La frequenza con cui la sfera pulsa esercita anch'essa una grande influenza accorciando o allungando la lunghezza d'onda, secondo che la pulsazione è più rapida o più lenta.

Il concetto d'onda si è mostrato assai fecondo in fisica. Esso è un concetto prettamente meccanico. Il fenomeno viene ridotto al moto delle particelle che secondo la teoria cinetica costituiscono la materia. Pertanto qualsiasi teoria che utilizzi il concetto di onda va considerata come una teoria meccanica. La spiegazione dei fenomeni acustici è basata essenzialmente su tale concetto. Dei corpi vibranti, come le corde vocali o le corde di violino, sono sorgenti di onde sonore che si propagano nell'aria, allo stesso modo come già spiegato per le sfere pulsanti. Per tramite del concetto d'onda è dunque possibile ricondurre alla meccanica tutti i fenomeni acustici.

Abbiamo già posto in rilievo come si debba distinguere fra il moto delle particelle e il moto dell'onda, che è uno stato del mezzo in cui questa si produce. I due moti sono molto differenti, ma è evidente che nel nostro esempio della sfera pulsante entrambi i moti si effettuano lungo una stessa linea retta. Le brevi oscillazioni lineari delle particelle componenti il mezzo e che ne causano l'aumento o la diminuzione di densità si producono radialmente alla sfera. Sono del pari radiali alla sfera le rette lungo le quali si propaga la periodica variazione di densità del mezzo, ovverossia l'onda. Le onde di questo tipo si chiamano *longitudinali*. Ma è questa l'unica specie di onde? È di grande importanza per le nostre ulteriori considerazioni accertare la possibilità di un'altra specie di onde, denominate *trasversali*.



Modifichiamo ora l'esperimento. Supponiamo che la nostra sfera sia immersa non più in aria o in acqua, ma in un mezzo di tutt'altra natura e cioè in qualche cosa di *simile alla gelatina*. Supponiamo inoltre che la sfera invece di pulsare, ruoti intorno a un asse fisso, descrivendo un piccolo angolo, prima in un senso, poi in senso opposto e sempre con lo stesso ritmo, e intorno a un asse definito. La gelatina aderisce alla sfera e perciò le parti aderenti sono costrette a seguirne i movimenti. A loro volta le parti aderenti costringono quelle che seguono a imitarne i movimenti, e così via, di modo che

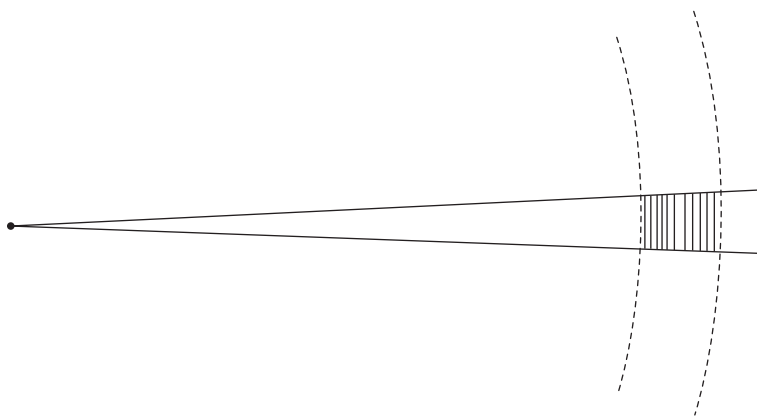


un'onda si propaga nel mezzo. Rammentando la distinzione fra il moto del mezzo e il moto dell'onda, è facile rendersi conto che in questo caso tali moti non si effettuano nella stessa direzione. L'onda si propaga nella direzione del raggio della sfera, mentre le particelle del mezzo si muovono perpendicolarmente a detta direzione. L'onda creata in tal modo è dunque trasversale.

Le onde che si propagano alla superficie dell'acqua sono trasversali. Un turacciolo galleggiante non fa che oscillare in senso perpendicolare, mentre l'onda si propaga su un piano orizzontale. In cambio, le onde sonore ci offrono il più noto esempio di onde longitudinali.

Ancora un'osservazione: l'onda prodotta in un mezzo omogeneo da una sfera, sia questa pulsante od oscillante, è un'onda sferica, così chiamata perché in qualsiasi dato istante tutti i punti situati su uno stesso involucro sferico, attorniante la sorgente del moto, si comportano in modo identico.

Se consideriamo soltanto un piccolo elemento di un simile involucro sferico, situato a grande distanza dalla sorgente, vediamo che quanto più lontano e piccolo è tale elemento, tanto più esso somiglia a un piano. Senza pretendere troppo rigore possiamo ammettere che non ci sia differenza fra un piccolo elemento piano e uno sferico ugualmente piccolo, e il cui raggio sia assai lungo. Piccoli elementi di onde sferiche, situati molto distante dalla sorgente



vengono chiamati *onde piane*. Quanto più allontaniamo la parte tratteggiata del nostro disegno, riducendo al contempo l'angolo fra i due raggi, e tanto più perfetta risulterà la nostra rappresentazione di un'onda piana. Come tanti altri concetti fisici, anche il concetto di onda piana è fittizio, sebbene si accosti con grande approssimazione alla realtà. Esso è tuttavia un concetto assai utile, cui dovremo ricorrere più avanti.

## La teoria ondulatoria della luce

Ricordiamoci perché abbiamo sospeso la descrizione dei fenomeni ottici. Contemplavamo la convenienza di adottare una teoria della luce diversa da quella corpuscolare, ma pur sempre suscettibile di spiegare le stesse categorie di fatti. A tal fine abbiamo dovuto interrompere il filo del nostro discorso per introdurre il concetto di onda. Ora possiamo tornare al nostro soggetto.

Fu Huygens, un contemporaneo di Newton, a proporre una teoria del tutto nuova. Nel suo trattato sulla luce egli scrisse:

Se oltre ciò, il passaggio della luce richiede tempo, il che non tarderemo a vedere, ne conseguirà che questo movimento impresso alla materia interposta sarà progressivo e pertanto si propagherà, come fa il suono, per superfici sferiche e per onde; poiché le chiamo onde per la loro somiglianza con quelle che vediamo formarsi nell'acqua allorché vi si getta un sasso e la cui propagazione si effettua in circoli successivi, sebbene queste ultime traggano origine da un'altra causa e si estendano soltanto su una superficie piana.

Secondo Huygens la luce è un'onda, un trasferimento cioè di energia e non già di sostanza. Abbiamo visto che la teoria corpuscolare spiega molti dei fatti osservati. La teoria ondulatoria è anch'essa in grado di farlo? Dovremo rinnovare gli interrogativi cui la teoria corpuscolare ha già risposto, al fine di verificare se la teoria ondulatoria risponde altrettanto bene. Lo faremo sotto forma di un dialogo fra *N* e *H*, in cui *N* è un fedele della teoria corpuscolare di Newton e *H* un seguace della teoria di Huygens. Nessuno dei due addurrà argomenti derivanti da lavori posteriori a quello dei due grandi maestri.

*N* Nella teoria corpuscolare la velocità della luce ha un significato molto preciso. È la velocità con la quale i corpuscoli attraversano lo spazio vuoto. Che cosa significa essa nella teoria ondulatoria?

*H* Significa, beninteso, la velocità dell'onda luminosa. Tutte le onde che conosciamo si propagano con una certa velocità e così pure farà un'onda luminosa.

*N* Ciò non è così semplice come sembra. Le onde sonore si propagano nell'aria e le onde marine nell'acqua. Ogni specie di onda deve avere un mezzo materiale in cui viaggiare. La luce tuttavia attraversa il vuoto, ciò che il suono non fa. Ammettere un'onda nello spazio vuoto significa in realtà non ammettere nessuna onda.

*H* Sì, questa è una difficoltà ed essa non mi è nuova. Il mio maestro vi rifletté profondamente e venne alla conclusione che l'unica via d'uscita era quella di assumere una sostanza ipotetica e cioè l'etere, un mezzo trasparente e permeante l'universo intero. L'universo è per così dire immerso in etere. Se abbiamo il coraggio d'introdurre questo concetto, tutto il resto diventa chiaro e convincente.

*N* Ma io respingo questa congettura. In primo luogo essa introduce una nuova sostanza ipotetica e in fisica ne abbiamo già fin troppe. C'è anche un'altra obiezione. Voi ritenete, senza dubbio, che tutto vada spiegato per mezzo della meccanica. Ma come faremo con l'etere? Siete in grado di rispondere al semplice quesito di quale sia la struttura conferita all'etere dalle sue particelle elementari e del come l'etere si palesi in altri fenomeni?

*H* La vostra prima obiezione è certamente giustificata. Ma con l'introduzione alquanto artificiosa dell'etere «imponderabile» ci liberiamo di colpo da tutti i molto più artificiosi corpuscoli luminosi. Non abbiamo più che una sola «misteriosa» sostanza in luogo dell'infinito numero di esse corrispondenti a tutti i diversi colori dello spettro. Non vi sembra che ciò costituisca un vero progresso? Così, per lo meno, tutte le difficoltà si concentrano in un sol punto e non c'è più bisogno della fittizia ipotesi secondo cui particelle differenti appartenenti a colori differenti attraversano lo spazio vuoto, tutte con la medesima velocità. Il vostro secondo argomento è giusto anch'esso. Non possiamo ancora dare una spiegazione meccanica dell'etere. Ma non vi è dubbio che la sua struttura verrà messa in chiaro dai futuri studi sui fenomeni ottici e forse altri. Per il momento dobbiamo rimanere in attesa di nuovi esperimenti e argomenti, ma ritengo che alla fine si riuscirà certamente a chiarire il problema della struttura meccanica dell'etere.



*N* Lasciamo per ora questa questione dal momento che non possiamo risolverla. Desidererei sapere in qual modo la vostra teoria spiega quei fenomeni che sono così chiari e comprensibili in base alla teoria corpuscolare. Consideriamo, ad esempio, il fatto che i raggi luminosi attraversano in linea retta tanto il vuoto come l'aria. Un pezzetto di carta posto davanti al lume di una candela produce sulla parete un'ombra nettamente delimitata. Se la teoria ondulatoria della luce fosse vera, l'ombra non potrebbe essere netta, poiché le onde s'infletterebbero intorno ai margini del pezzetto di carta smorzandone così l'ombra. Voi sapete che una barchetta non è un ostacolo per le onde del mare, le quali s'inflettono intorno ad essa senza produrre ombra.

*H* Questo non è un argomento convincente. Consideriamo il caso delle onde corte che si producono su un fiume e che percuotono il fianco di una grossa barca. Le onde percuotenti un fianco della barca non si vedranno sull'altro fianco. Se le onde sono abbastanza piccole e la barca è sufficientemente grande si produrrà un'ombra ben marcata. È molto probabile che la luce sembri propagarsi in linea retta soltanto perché la sua lunghezza d'onda è molto piccola rispetto alle dimensioni degli ostacoli e delle aperture cui si ricorre comunemente negli esperimenti. Se potessimo procurarci degli ostacoli sufficientemente piccoli, constateremmo probabilmente che essi non gettano ombra. È verosimile che, volendo costruire apparecchi atti a dimostrare se la luce è suscettibile o meno di contornare gli ostacoli, urteremmo contro gravi difficoltà. Tuttavia se un esperimento simile potesse venire escogitato esso sarebbe cruciale nel decidere fra la teoria ondulatoria e la teoria corpuscolare della luce.

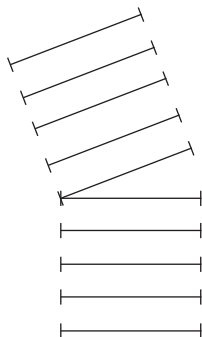
*N* Può darsi che in futuro la teoria ondulatoria trovi appoggio in nuovi fatti, ma per ora non conosco dati sperimentali che la confermino in modo convincente. Finché non sia definitivamente provato che la luce può contornare gli ostacoli, non vedo ragione per non seguire a credere nella teoria corpuscolare che mi pare più semplice e pertanto migliore della teoria ondulatoria.

Qui possiamo interrompere il dialogo, ancorché il soggetto sia tutt'altro che esaurito.

Dobbiamo ancora vedere in qual modo la teoria ondulatoria spieghi la rifrazione della luce e la varietà dei colori. Come sappiamo

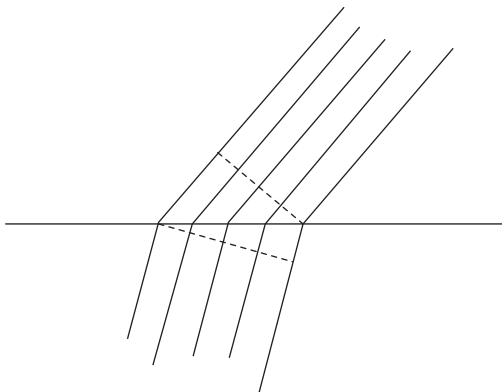
la teoria corpuscolare è in grado di farlo. Cominceremo con la rifrazione, ma converrà considerare anzitutto un caso che non ha nulla a che fare con l'ottica.

Figuriamoci un largo spazio aperto, nel quale due uomini camminano tenendo orizzontalmente per le sue estremità una stanga rigida. Essi procedono dritto innanzi a loro e con la stessa velocità.



Finché la loro velocità, qualunque essa sia, rimane invariata, la stanga avanzerà parallelamente, vale a dire non girerà, né cambierà di direzione. Tutte le posizioni consecutive della stanga saranno parallele le une alle altre. Supponiamo ora che, all'improvviso, per un attimo – una frazione di secondo – il moto dei nostri due uomini cessi di essere uguale. Che cosa avverrà? È chiaro che durante questo istante la stanga girerà e la sua nuova posizione non sarà più parallela a quella iniziale. Per cui, allorché le velocità dei due uomini torneranno a essere uguali, ciò avverrà in una direzione differente da prima. Il disegno lo mostra in modo chiaro. Il cambiamento di direzione si è verificato durante l'attimo in cui le velocità dei due uomini si sono differenziate.

Questo esempio ci permette di capire la rifrazione di un'onda. Mettiamo che un'onda piana, in moto attraverso l'etere, colpisca una lastra di vetro. Nel disegno a pagina seguente vediamo un'onda con un fronte di avanzata relativamente largo. Il fronte dell'onda è un piano nel quale a ogni istante tutte le parti dell'etere si comportano in modo identico. La velocità della luce dipende dal mezzo attraversato e perciò nel vetro essa non sarà più la stessa come



nel vuoto. Durante il brevissimo istante in cui il fronte dell'onda penetra nel vetro, le diverse parti del fronte stesso avranno velocità diverse. È evidente che la parte del fronte che ha raggiunto il vetro avanzerà con la velocità che la luce possiede nel vetro, mentre il resto continuerà ad avanzare con la velocità della luce nell'etere. In ragione di questa differenza di velocità sul fronte dell'onda, durante il tempo richiesto dalla sua «immersione» nel vetro, la direzione dell'onda stessa cambierà.

Vediamo dunque che non soltanto la teoria corpuscolare, ma anche la teoria ondulatoria conduce a una spiegazione della rifrazione. Considerazioni ulteriori, unitamente a un po' di matematica, dimostrano che la spiegazione fornita dalla teoria ondulatoria è più semplice e più soddisfacente e che le conclusioni sono in perfetto accordo con i fatti osservati. Metodi di ragionamento quantitativi ci pongono in grado di calcolare la velocità della luce in un mezzo rifrangente, a condizione di sapere in qual modo il fascio luminoso si rifrange al penetrare nel mezzo stesso. Misurazioni dirette confermano pienamente tali predizioni e pertanto anche la teoria ondulatoria della luce.

Resta ancora la questione del colore.

Rammentiamo che un'onda è caratterizzata da due numeri e cioè la sua velocità e la sua lunghezza d'onda. Il presupposto essenziale della teoria ondulatoria della luce è che lunghezze d'onda differenti corrispondono a colori differenti. La lunghezza d'onda della luce gial-

la omogenea differisce da quella del rosso o del violetto. In luogo dell'artificiosa separazione fra corpuscoli appartenenti ai vari colori, abbiamo la naturale differenziazione fra lunghezze d'onda.

Ne segue che l'esperimento di Newton sulla dispersione della luce può venire descritto in due linguaggi diversi, quello della teoria corpuscolare e quello della teoria ondulatoria. Ad esempio:

*Linguaggio corpuscolare*

I corpuscoli appartenenti a colori differenti hanno tutti la stessa velocità nel vuoto, ma velocità diverse nel vetro.

La luce bianca è una miscela dei corpuscoli appartenenti a tutti i diversi colori. Nello spettro essi risultano separati.

*Linguaggio ondulatorio*

I raggi di lunghezze d'onda differenti, a seconda dei differenti colori, hanno la stessa velocità nell'etere, ma velocità diverse nel vetro.

La luce bianca è una composizione di tutte le differenti lunghezze d'onda. Nello spettro queste risultano separate.

È consigliabile evitare l'ambiguità derivante dall'esistenza di due diverse teorie sugli stessi fenomeni decidendo, dopo attenta disamina dei rispettivi pregi e difetti, in favore dell'una o dell'altra. Il dialogo fra *N* e *H* sta a provare che l'impresa non è facile, poiché in base agli argomenti invocati, la decisione si presenta piuttosto come questione di gusto che di convincimento scientifico. Sta di fatto che ai tempi di Newton e per oltre cento anni dopo di lui, la maggior parte dei fisici preferirono la teoria corpuscolare.

Il verdetto a favore della teoria ondulatoria della luce e contro la teoria corpuscolare venne soltanto in epoca assai posteriore, e cioè verso la metà del XIX secolo. Nella discussione riportata sopra *H* dichiarava che una decisione fra le due teorie era, in linea di massima, sperimentalmente possibile. Secondo la teoria corpuscolare, la luce non può contornare gli ostacoli e le ombre devono essere nettamente delimitate. Viceversa, secondo la teoria ondulatoria un ostacolo, se abbastanza piccolo, non deve produrre ombra. Questo fatto e altri consimili vennero verificati sperimentalmente da Young e da Fresnel, che ne trassero altresì le dovute conclusioni.

Abbiamo già avuto occasione di discutere un esperimento assai semplice, secondo il quale uno schermo contenente un foro veniva collocato davanti a una sorgente luminosa puntiforme che proiettava

su una parete l'immagine del foro, contornata da un'ombra nettamente delimitata. Semplifichiamo in primo luogo l'esperimento, valendoci di una sorgente di luce omogenea che, a ogni buon fine, converrà sia piuttosto forte. Riduciamo inoltre le dimensioni del foro nello schermo. Se riusciamo a ottenere un forellino molto piccolo e se la sorgente di luce è abbastanza forte assisteremo a un fenomeno non soltanto del tutto nuovo e sorprendente ma altresì incomprendibile in base alla teoria corpuscolare. Non vedremo più una separazione netta fra luce e oscurità. La luce si smorzerà gradualmente passando al fondo scuro con una serie di anelli chiari e scuri. Ma l'apparizione di anelli è caratteristica dei processi ondulatori. La spiegazione per l'alternarsi di aree chiare e scure risulterà più semplice con un dispositivo sperimentale alquanto diverso. Prendiamo un foglio di carta nera con due fori di spillo attraverso i quali la luce possa passare. Se i forellini sono vicini e molto piccoli e se la sorgente di luce omogenea è abbastanza forte, vedremo apparire sulla parete tante frange chiare e scure, le cui estremità sfumano nel fondo scuro. La spiegazione è semplice. Una frangia scura appare dove il solco di un'onda passata per uno dei forellini incontra la cresta di un'onda passata per l'altro forellino di modo che le due onde si elidono. Una frangia chiara appare invece dove i solchi e le creste di due onde passate attraverso i due diversi forellini s'incontrano rafforzandosi. La spiegazione è molto più complicata nel caso precedente, quello cioè degli anelli chiari e scuri che si producono con un solo forellino; ma il principio è il medesimo. Converrà tener presente quest'apparizione di frange scure e chiare se i forellini sono due e di anelli chiari e scuri se il forellino è uno solo, poiché più avanti avremo occasione di riaprire la discussione su queste due immagini luminose. Gli esperimenti appena descritti mostrano la diffrazione della luce, vale a dire la deviazione dalla linea retta della propagazione dell'onda luminosa allorché piccolissimi fori o piccolissimi ostacoli vengono a trovarsi sul suo percorso.

Con l'aiuto di un po' di matematica siamo in grado di spingerci assai più oltre. Possiamo infatti calcolare quanto grande o, per meglio dire, quanto piccola debba essere la lunghezza d'onda per ottenere una determinata figura di diffrazione. Gli esperimenti descritti ci consentono dunque di misurare la lunghezza d'onda della

luce omogenea adoperata come sorgente. Per dare un'idea di quanto piccoli siano i numeri in questione, citeremo le due lunghezze d'onda corrispondenti ai due estremi dello spettro solare e cioè il rosso e il violetto.

La lunghezza d'onda della luce rossa è di 0,00008 cm.

La lunghezza d'onda della luce violetta è di 0,00004 cm.

Non c'è da stupirsi se questi numeri sono così piccoli. Il fenomeno delle ombre nette, vale a dire il fenomeno della propagazione rettilinea della luce che si osserva in natura dipende unicamente dal fatto che tutti i fori e gli ostacoli con cui si ha a che fare sono molto grandi rispetto alla lunghezza d'onda della luce. È soltanto quando si ricorre a fori od ostacoli molto piccoli che la luce rivela la propria natura ondulatoria.

Ma la storia della ricerca di una teoria della luce è lungi dal terminare qui. Il verdetto del XIX secolo non era né finale né definitivo. Per il fisico moderno l'intero problema di decidere fra corpuscoli e onde è di nuovo sul tappeto e questa volta in forma assai più profonda e intricata. Ciò nonostante ammetteremo provvisoriamente la disfatta della teoria corpuscolare della luce, in attesa di riconoscere il carattere problematico del trionfo della teoria ondulatoria.

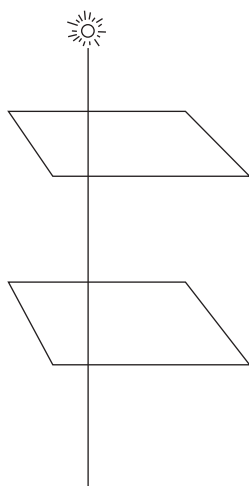
Le onde luminose sono longitudinali o trasversali?

Tutti i fenomeni ottici fin qui considerati parlano in favore della teoria ondulatoria. I più solidi argomenti in suo appoggio sono anzitutto l'inflessione della luce intorno a piccoli ostacoli, e la soddisfacente spiegazione della rifrazione. Ma guidati dal punto di vista meccanicistico ci rendiamo conto che c'è ancora una grossa questione da chiarire, e cioè quella delle proprietà meccaniche dell'etere. Per poter risolvere questo problema è essenziale sapere se le onde luminose nell'etere sono longitudinali o trasversali. In altre parole: la luce si propaga forse come il suono? L'onda luminosa è forse dovuta a variazioni di densità del mezzo, per cui l'oscillazione delle particelle eterree si effettua nella stessa direzione della propagazione dell'onda? O al contrario, assomiglia forse l'etere a una gelatina elastica, vale a dire a un mezzo in cui non possono prodursi altro che onde trasversali, cosicché le particelle oscillano in direzione perpendicolare a quella della propagazione dell'onda?

Prima di ricorrere all'esperimento domandiamoci quale sarebbe la risposta preferibile. È ovvio che ci potremmo reputare fortunati se le onde luminose fossero longitudinali. In tal caso le difficoltà inerenti alla rappresentazione di un etere meccanico sarebbero assai minori. Potremmo infatti figurarci l'etere per analogia con la rappresentazione meccanica dei gas, che ci pone in grado di spiegare la propagazione delle onde sonore. Riuscirebbe assai più difficile raffigurarci un etere suscettibile di trasmettere onde trasversali. Immaginare un mezzo, tipo gelatina, composto di particelle atte a propagare onde luminose trasversali, è un compito tutt'altro che facile. Huygens riteneva che l'etere si sarebbe rivelato simile all'«aria», anziché simile a «gelatina». Ma madre natura poco si cura delle

nostre difficoltà. Fu in questo caso clemente con i fisici che tentavano d'interpretare tutti i fatti dal punto di vista meccanicistico?

Per rispondere a questa domanda dobbiamo discutere alcuni nuovi esperimenti. Dei molti che ci possono fornire una risposta, ne considereremo uno solo. Supponiamo di avere una sottilissima lamella ricavata in modo speciale, che non staremo a precisare, da un cristallo di tormalina. Se la lamella è molto sottile potremo vedere attraverso di essa una sorgente luminosa. Prendiamo ora due di tali lamelle e interponiamole entrambe fra il nostro occhio e la luce. Che cosa ci aspettiamo di vedere? Evidentemente un punto luminoso come prima, sempre che entrambe le lamelle siano abbastanza sottili. Vi sono non poche probabilità che la prova soddisfi la nostra aspettativa. Senza troppo preoccuparci di questa allusione alla probabilità del risultato, supponiamo che attraverso i due cristalli possa effettivamente vedersi il punto luminoso. Modifichiamo ora gradualmente la posizione di uno dei cristalli facendolo ruotare, il che ha significato soltanto se la posizione dell'asse intorno al quale ha luogo la rotazione rimane fissa. Scegliendo come asse l'allineamento determinato dal raggio luminoso che giunge al nostro occhio, gli unici punti del cristallo che non si spostano con la rotazione sono quelli situati sul detto asse. Accadrà un fatto strano! La





luce s'indebolirà sempre più, fino a spegnersi del tutto. Continuando però il movimento rotativo, la luce comincerà a riapparire e la vedremo distintamente come prima, allorché la posizione iniziale sarà di nuovo raggiunta.

Senza addentrarci nei dettagli di questo esperimento e di altri simili, ci porremo la seguente domanda: possono fenomeni come questi spiegarsi ammettendo che le onde luminose siano longitudinali? Nel caso di onde longitudinali le particelle di etere si muoverebbero lungo l'asse di rotazione, come fa il raggio luminoso. Con la rotazione del cristallo non si produce nessun cambiamento lungo l'asse; i punti situati su di esso non si muovono e nelle vicinanze immediate gli spostamenti sono insignificanti. È pertanto evidente che un cambiamento radicale come la sparizione e la riapparizione della luce non potrebbe verificarsi qualora l'onda fosse longitudinale. In verità questo e altri fenomeni simili possono spiegarsi soltanto ammettendo che le onde siano trasversali e non longitudinali. In altre parole dobbiamo assumere un etere tipo gelatina. Ciò è assai increscioso! Dobbiamo prevedere d'imbarbarci in difficoltà insormontabili nel tentare di farci una rappresentazione meccanica dell'etere.

## L'etere e l'interpretazione meccanicistica

Sarebbe fuori luogo ingolfarci nella lunga discussione dei molti tentativi volti a intendere la natura meccanica dell'etere, quale mezzo suscettibile di trasmettere la luce. Come sappiamo, un congegno meccanico implica la presenza di una sostanza composta di particelle, con forze agenti fra di esse, lungo le loro linee di congiunzione, e dipendenti unicamente dalla distanza. Per dar forma al modello di un etere meccanico tipo gelatina, i fisici dovettero ricorrere a una serie di congetture artificiose quanto mai e contro natura. Non ci attarderemo a ricordarle, poiché esse appartengono a un passato ormai superato. Ci limiteremo a constatare che ebbero conseguenze di grande portata. Infatti tanto il carattere artificioso di tali congetture, quanto la loro molteplicità, congiunta a deficiente interdipendenza, finì con lo scuotere la fiducia nello schema meccanicistico.

Alle difficoltà di una plausibile costruzione dell'etere, si sovrappongono altre obiezioni più semplici e dirette. Se accettiamo la spiegazione meccanicistica dei fenomeni ottici, dobbiamo anche ammettere che l'etere penetri e si estenda ovunque. Non può esserci spazio vuoto, se occorre un mezzo per trasmettere la luce.

Eppure la meccanica c'insegna che lo spazio interstellare non offre resistenza di sorta al moto dei corpi materiali. I pianeti, ad esempio, si spostano attraverso il presunto etere-gelatina senza incontrare la resistenza che un mezzo materiale dovrebbe necessariamente opporre al loro moto. Ma se l'etere non modifica il moto dei corpi materiali, ciò vuol dire che non si verificano azioni reciproche fra particelle d'etere e particelle materiali. D'altro canto la luce non passa soltanto attraverso l'etere; essa passa anche attraverso il vetro e l'acqua. Ma in queste ultime sostanze essa cambia di velocità. Qual è la spiegazione meccanicistica di questo fatto? La

sola ammissibile è quella di un'azione reciproca fra particelle d'etere e particelle materiali. Ma abbiamo appena visto che nel caso di corpi in moto libero, tali azioni reciproche si deve assumere non esistano. In altre parole si verificherebbero delle azioni reciproche fra etere e materia nei fenomeni ottici, ma non nei fenomeni meccanici! Questa è davvero una conclusione paradossale!

La via d'uscita da tutte queste difficoltà sembra essere una sola. Durante l'intero sviluppo della scienza fino al xx secolo il tentativo d'interpretare i fenomeni naturali partendo da criteri meccanicistici condusse alla invenzione di sostanze artificiali quali i fluidi elettrici e magnetici, i corpuscoli luminosi o l'etere. Il risultato pratico fu di concentrare tutte le difficoltà su taluni punti, come è stato fatto con l'etere, nel caso dei fenomeni ottici. Qui l'inermità degli sforzi per escogitare un etere meccanico plausibile, nonché le obiezioni cui abbiamo accennato, sembrano indicare che il punto debole risiede nella presunzione fondamentale che tutti gli eventi naturali possano trovare una spiegazione entro lo schema meccanicistico. E in verità la scienza non è pervenuta ad attuare il programma meccanicistico in modo convincente. Oggi nessun fisico crede più che ciò sia possibile.

Nella nostra breve rassegna delle principali idee poste a base della fisica, ci siamo imbattuti in alcuni problemi insoluti, nonché in difficoltà e ostacoli che hanno mandato a vuoto i tentativi per formulare un'interpretazione uniforme e coerente di tutti i fenomeni del mondo esterno. Ricordiamo in primo luogo l'importante indizio dell'equivalenza fra massa pesante e massa inerte, indizio negletto dalla meccanica classica. In secondo luogo il carattere artificioso dei fluidi elettrici e magnetici. In terzo luogo la difficoltà per definire le azioni reciproche fra corrente elettrica e ago magnetico. In questo caso la forza, oltre a non agire lungo la linea congiungente il filo conduttore e il polo magnetico, dipende dalla velocità della carica in moto, cosicché la legge che definisce direzione e grandezza della forza risulta estremamente complicata. A tutto ciò si aggiungano le difficoltà insormontabili che si accompagnano all'ipotesi dell'etere.

La fisica moderna ha attaccato tutti questi problemi e li ha risolti. Ma dalla lotta impegnata per giungere a una soluzione sono sorti nuovi e più complessi problemi. La nostra conoscenza è oggi più vasta e più profonda di quella dei fisici del xix secolo, ma altrettanto può dirsi dei nostri dubbi e delle nostre difficoltà.

## Riassumiamo

Nelle antiche teorie dei fluidi elettrici, come anche nelle teorie, sia corpuscolare, che ondulatoria della luce, assistiamo a ulteriori tentativi per l'applicazione del criterio meccanicistico. Tuttavia nell'ambito dei fenomeni elettrici e ottici tale applicazione incontra gravi difficoltà.

Una carica elettrica in movimento agisce sopra un ago magnetico. Ma la forza invece di dipendere unicamente dalla distanza dipende altresì dalla velocità della carica. Inoltre la forza non esercita né attrazione né repulsione, ma agisce perpendicolarmente alla linea congiungente l'ago e la carica.

Nel dominio dell'ottica dobbiamo decidere a favore della teoria ondulatoria e contro la teoria corpuscolare della luce. La rappresentazione di onde che si propagano in un mezzo composto di particelle, fra le quali agiscono delle forze, risponde a un criterio prettamente meccanicistico. Ma qual è il mezzo attraverso il quale si propaga la luce e quali sono le sue proprietà meccaniche? Finché questo quesito non riceve risposta è vano sperare di poter ridurre i fenomeni ottici a fenomeni meccanici. Ma le difficoltà sollevate da questo problema sono così gravi, che dobbiamo rinunciare a risolverlo, il che conduce fatalmente a rinunciare altresì a una interpretazione generale d'ordine meccanico.

*Parte terza*

Campo, relatività

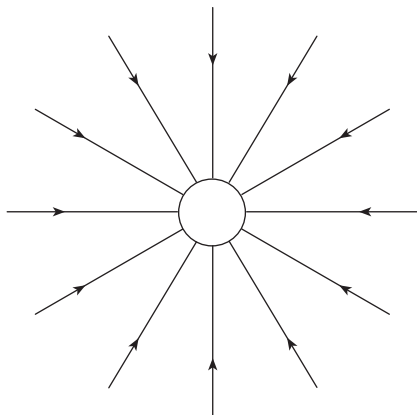


## Campo come rappresentazione

Durante la seconda metà del XIX secolo idee nuove e rivoluzionarie permearono la fisica e aprirono il varco a nuovi criteri filosofici, in contrasto con l'interpretazione meccanicistica. I risultati dei lavori di Faraday, di Maxwell e di Hertz condussero allo sviluppo della fisica moderna, alla creazione, cioè, di nuovi concetti che ci offrono una nuova immagine della realtà.

Il nostro compito è ora quello di descrivere il sovvertimento prodotto nella scienza da questi nuovi concetti e di mostrare come essi si siano gradualmente chiariti e rinsaldati. Proveremo a seguire la via del progresso dal punto di vista logico, senza troppo preoccuparci dell'ordine cronologico.

I nuovi concetti sorsero dallo studio dei fenomeni elettrici, ma riesce più facile cominciare col presentarli appoggiandoci alla meccanica. Sappiamo che due particelle si attraggono mutuamente e che la forza di attrazione diminuisce con il quadrato della distanza. Possiamo rappresentare questo fatto in modo nuovo, ancorché non si scorga subito il vantaggio che ne può derivare. Il piccolo cerchio nel disegno che segue rappresenta un corpo dotato di attrazione, poniamo il Sole. In realtà il nostro diagramma dev'essere considerato come un modello nello spazio e non come un disegno nel piano. Pertanto, il nostro cerchietto sostituisce una sfera; abbiamo detto il Sole. Un corpo qualsiasi, il cosiddetto *corpo di prova*, collocato ovunque, in vicinanza del Sole, ne subirà l'attrazione, lungo la linea congiungente i centri rispettivi. Cosicché le linee del nostro disegno indicano la direzione della forza attrattiva del Sole, per posizioni diverse del corpo di prova. La freccia di ogni linea mostra che la forza è diretta verso il Sole, il che significa precisamente che la forza



è attrattiva. Diremo che queste sono *le linee di forza del campo gravitazionale*, senza attribuire una portata speciale a tale denominazione. Notiamo però subito un lato caratteristico della nostra raffigurazione e cioè che *le linee di forza* s'intendono tracciate nello spazio vuoto di materia. Più avanti avremo occasione di ricalcare questa circostanza. Per ora, tutte le linee di forza, o in una sola parola *il campo*, stanno a indicare soltanto come si comporterebbe un corpo di prova, collocato ovunque, in prossimità della sfera, per la quale abbiamo costruito il campo stesso. Le linee del nostro modello spaziale sono sempre perpendicolari alla superficie della sfera. Poiché divergono dallo stesso centro, esse sono più dense vicino alla sfera e lo divengono sempre meno, con la maggior lontananza. Quando la distanza dalla sfera aumenta del doppio o del triplo, la densità delle linee è quattro e rispettivamente nove volte inferiore; ciò beninteso non già nel piano del disegno, bensì nel corrispondente modello spaziale. Le nostre linee servono in tal modo a un doppio scopo. Anzitutto ci danno la direzione della forza agente su un corpo situato in prossimità della sfera-Sole; inoltre la loro densità ci mostra come la forza vari con la distanza. Il disegno del campo, correttamente interpretato ci fornisce la direzione della forza gravitazionale, nonché il rapporto secondo cui la forza dipende dalla distanza. La legge della gravitazione può leggersi nel nostro disegno, con chiarezza pari a quella di una definizione in parole o del preciso ed economico linguaggio di una formula matematica.



Questa *rappresentazione del campo*, come possiamo chiamarla, è dunque incontestabilmente chiara e interessante. Tuttavia, ciò non basta per ritenere che essa costituisca un progresso effettivo. Né può dirsi che nel caso della gravitazione appaia molto utile. Potrebbe forse sembrar comodo considerare le linee del campo come qualcosa più di un disegno o di un modello e d'immaginare che la forza agisca effettivamente per loro tramite. Ciò è lecito, ma induce a presumere che l'azione lungo le linee di forza si trasmetta con velocità infinita. Infatti, secondo la legge di Newton, la forza di attrazione tra due corpi dipende soltanto dalla distanza; il tempo non conta. La forza dovrebbe dunque passare da un corpo all'altro nel tempo zero! Ma siccome un movimento qualsiasi con velocità infinita non è razionalmente concepibile, il tentativo d'interpretare il nostro disegno come qualcosa di più di un modello non conduce a nulla.

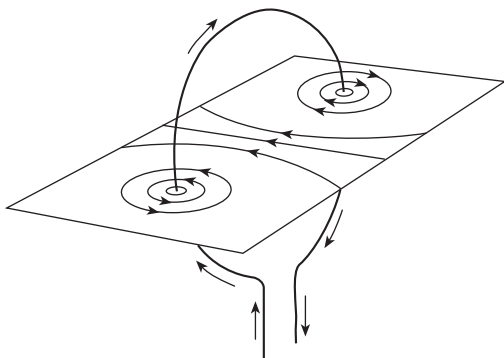
Non intendiamo per altro discutere ora il problema della gravitazione. Ce ne siamo serviti soltanto a mo' d'introduzione, per agevolare la comprensione di analoghi metodi di ragionamento, nella teoria dell'elettricità.

Cominceremo con la discussione dei già menzionati esperimenti che misero in grave imbarazzo l'interpretazione meccanicistica. Avevamo una corrente circolante in un filo piegato a cerchio. Avevamo inoltre un ago magnetico al centro del circuito. Appena la corrente cominciava a circolare, si manifestava una nuova forza agente sul polo magnetico e diretta perpendicolarmente al piano del circuito, ossia a qualsiasi linea congiungente il filo e il polo magnetico. La stessa forza si manifesta anche se alla corrente si sostituisce una carica elettrica in moto circolare, nel qual caso, come dimostrò Rowland, l'intensità della forza dipende dalla velocità della carica. Questi fatti sperimentali sono incompatibili con il criterio filosofico, secondo cui tutte le forze devono agire lungo la linea congiungente le particelle sollecitate e non possono dipendere che dalla distanza.

La definizione esatta del come la forza di una corrente agisce su un polo magnetico è assai intricata, e in verità molto più complicata della definizione delle forze gravitazionali. Possiamo tuttavia tentare di raffigurarci le azioni in gioco, come abbiamo fatto per le forze di gravitazione. Il nostro quesito è il seguente: con quale forza

agisce la corrente su un polo, ovunque situato, purché vicino ad essa? Sarebbe assai difficile definire questa forza in parole, e finanche una formula matematica risulterebbe complessa e astrusa. Non vi è di meglio che rappresentare quanto sappiamo sulle forze in gioco mediante un disegno o piuttosto un modello spaziale delle linee di forza. Ci scontriamo però a un inconveniente, in quanto un polo magnetico non esiste senza il polo contrario, avendosi così sempre un dipolo. È tuttavia lecito immaginare l'ago magnetico di lunghezza tale da permetterci di tener conto soltanto della forza agente sul polo più vicino alla corrente. Ove l'altro polo sia abbastanza lontano, la forza che agisce su di esso sarà trascurabile. Per evitare ogni ambiguità diremo che il polo più vicino al circuito è *il positivo*.

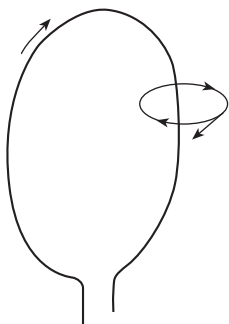
Il carattere della forza agente sul polo magnetico positivo può leggersi sul nostro disegno. Le frecce vicino alla grossa linea che rappresenta il filo indicano la direzione della corrente, dal potenziale più alto al più basso. Tutte le altre linee non sono che linee di forza appartenenti alla detta corrente e giacenti in uno stesso piano. Disegnate correttamente, esse c'indicano la direzione del vettore di forza, che sta a rappresentare l'azione della corrente sul nostro polo magnetico positivo. Esse c'informano anche sulla lunghezza di questo vettore. La forza, come sappiamo, è un vettore; e per determinarlo occorre conoscerne tanto la direzione, quanto la lunghezza. Il problema che c'interessa in primo luogo è quel-



lo della direzione della forza agente su un polo. Come possiamo ricavare dal disegno la direzione della forza, in qualsiasi punto dello spazio?

La regola per desumere la direzione della forza da un modello come questo non è così semplice come nel precedente esempio della sfera-Sole, le cui linee di forza erano delle rette. Per chiarire il *modus operandi*, ricorreremo a un diagramma nel quale è disegnata una sola linea di forza. Come indicato, il vettore di forza giace lungo la tangente alla linea di forza. Tanto la freccia del vettore di forza, come le frecce della linea di forza puntano nella stessa direzione. Questa è dunque la direzione nella quale la forza agisce in quel dato punto, su un polo magnetico. Un buon disegno o, piuttosto, un buon modello spaziale c'informa anche sulla lunghezza del vettore di forza in qualsiasi punto. Il vettore sarà più lungo dove le linee sono più dense, vale a dire vicino al filo, e più corte dove le linee sono meno dense, ovvero lontano dal filo.

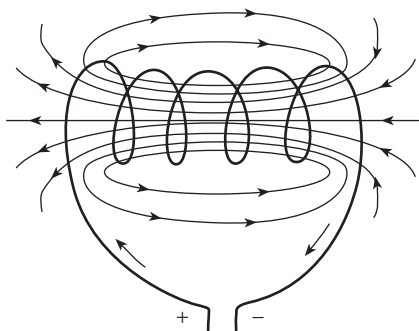
In tal modo l'insieme delle linee di forza, ovverosia il campo, ci pone in grado di determinare le forze agenti su un polo magnetico, in qualsiasi punto dello spazio. Abbiamo così una prima giustificazione per la nostra elaborata costruzione del campo. Sapendo ciò che il campo può palesarci, saremo indotti a esaminare con ben maggior interesse le linee di forza corrispondenti alla corrente. Queste linee sono cerchi avvolgenti il filo e giacenti nel piano perpendicolare a quello in cui è situato il filo stesso. Desumendo dal disegno il carattere della forza, giungiamo di nuovo alla conclusione che questa agisce in direzione perpendicolare a qualsiasi linea congiungente il filo



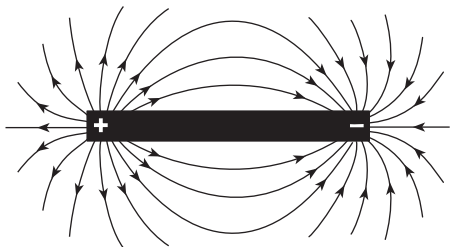
e il polo, giacché la tangente a un circolo è sempre perpendicolare al raggio. La nostra intera conoscenza delle forze agenti si riassume nella costruzione del campo. Il concetto di campo s'inserisce così fra il concetto di corrente e il concetto di polo magnetico per rappresentare in modo semplice le forze agenti.

Ogni corrente è associata a un campo magnetico, vale a dire: c'è sempre una forza che agisce su un polo magnetico, situato in prossimità del filo percorso da una corrente. Cogliamo l'occasione per notare che questa proprietà ci pone in grado di costruire apparecchi sensibilissimi per verificare l'esistenza di una corrente.

Avendo imparato a servirci del campo, ogni qual volta avremo da rappresentare l'azione delle forze magnetiche di una corrente, in un punto qualsiasi dello spazio, ricorreremo al disegno del campo che circonda un filo, comunque disposto o foggato, e nel quale circola una corrente.



Il nostro primo esempio sarà quello del cosiddetto solenoide, che consiste in un filo piegato a spirale. Il nostro obiettivo è di apprendere sperimentalmente quanto più è possibile sul campo magnetico associato alla corrente circolante nel solenoide e d'incorporare ciò che avremo appreso, nella raffigurazione di un campo. Ne risulterà il disegno qui riprodotto, nel quale le linee di forza sono curve chiuse che circondano il solenoide in modo caratteristico per il campo magnetico di una corrente. Anche il campo di una barretta magnetica può venire figurato allo stesso modo di quello di una corrente. Il disegno che segue ce lo mostra.



Il vettore di forza giace sempre nella tangente alla linea di forza e risulta più lungo in vicinanza ai poli, perché la densità delle linee è maggiore in questi punti. Il vettore di forza rappresenta l'azione della barretta su un polo magnetico positivo. Ma, in questo caso, la *sorgente* del campo l'abbiamo nel magnete e non più nella corrente.

Confrontiamo attentamente i nostri due ultimi disegni. Il primo ci mostra il campo magnetico di una corrente circolante in un solenoide; nel secondo vediamo il campo di una barretta magnetica. Prescindiamo dalle sorgenti, cioè tanto dal solenoide quanto dal magnete, e osserviamo solamente i due campi esterni. Noteremo subito che questi presentano caratteri identici; in entrambi i casi le linee di forza vanno da un'estremità all'altra del solenoide o del magnete.

La rappresentazione del campo porta il suo primo frutto! Sarebbe infatti assai difficile riconoscere una così pronunciata similarità fra la corrente circolante in un solenoide e un magnete lineare, ove non ci venisse rivelata dalla nostra costruzione del campo.

Il concetto di campo può ormai essere sottoposto a più severa prova. Non tarderemo a renderci conto se esso non sia qualcosa più di un nuovo modo di rappresentare le forze agenti. Proviamo a ragionare così: ammettiamo per un istante che il campo caratterizzi in modo unico le forze destinate dalla sua sorgente, qualunque essa sia. Questa non vuol essere che una congettura. Ma essa significherebbe che se un solenoide e una sbarra magnetica hanno gli stessi campi, anche tutti i loro effetti devono essere gli stessi. Significherebbe cioè che due solenoidi, nei quali circola una corrente, si comportano esattamente come due magneti lineari, attraendosi o respingendosi mutuamente,

a seconda della loro relativa posizione. Significherebbe inoltre che un solenoide e una sbarra magnetica si attirano e si respingono mutuamente, allo stesso modo di due sbarre. In breve, la nostra congettura significherebbe che tutti gli effetti prodotti da un solenoide nel quale circola una corrente corrispondono a quelli di una sbarra magnetica, poiché dipendono unicamente dal campo e questo possiede gli stessi caratteri in entrambi i casi. I risultati sperimentali confermano appieno la nostra congettura! Quanto sarebbe difficile riconoscere questi fatti senza il concetto di campo! La definizione della forza agente fra un filo percorso da una corrente e un polo magnetico è complicatissima. Nel caso di due solenoidi, occorre una laboriosa indagine sulle forze interagenti fra due correnti. Con l'ausilio del campo invece, afferriamo immediatamente il carattere di tutte quelle azioni, non appena scorgiamo la similarità fra il campo di un solenoide e quello di una sbarra magnetica.

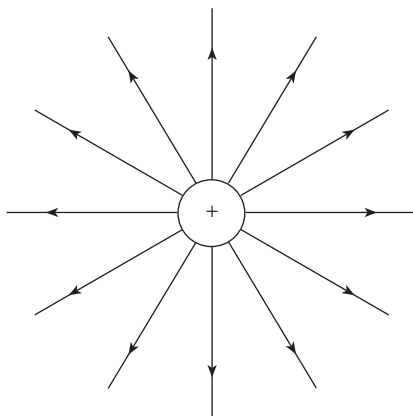
Siamo ormai autorizzati a tenere il campo in molto maggior conto di quanto potevamo supporre da prima. *Vediamo infatti che soltanto le proprietà del campo appaiono essenziali nella descrizione dei fenomeni; la diversità delle sorgenti non conta.* Il concetto di campo dimostra la propria importanza, anche conducendo a nuovi fatti sperimentali.

Il campo è dunque un concetto d'indiscutibile utilità. Da principio esso apparve come qualcosa che conveniva inserire fra la sua sorgente e l'ago magnetico, per facilitare la descrizione delle forze agenti. Poi poté considerarsi come un vero e proprio intermediario *o agente* della corrente, per mezzo del quale questa esplica la propria azione. Ma ora l'agente funge anche da interprete, col tradurre le leggi in un linguaggio semplice, chiaro e suggestivo.

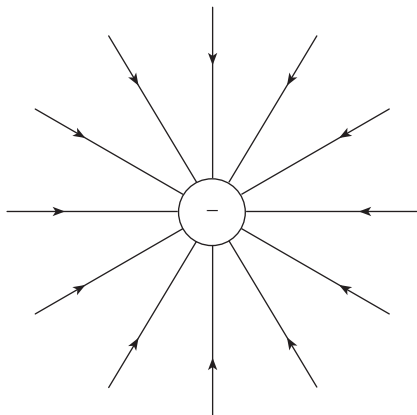
Il primo successo della costruzione del campo suggerisce che può essere conveniente considerare tutte le azioni delle correnti, dei magneti, nonché delle cariche elettriche, per via indiretta, ricorrendo cioè alla rappresentazione del campo quale interprete. Un campo deve considerarsi come qualcosa che è sempre associato a una corrente. Esso è sempre presente, anche in mancanza di un polo magnetico che ne riveli l'esistenza. Cerchiamo di valerci coerentemente di questa nuova indicazione.

Consideriamo il campo di un conduttore carico. Anche questo può concepirsi per analogia con il campo gravitazionale, o con il

campo di una corrente o di un magnete. Ricorriamo, come sempre, al caso più semplice, quello cioè di una sfera carica di elettricità positiva. Per disegnarne il campo, dobbiamo chiederci qual genere di forza agisca sopra un piccolo corpo di prova, dotato di carica positiva e situato in prossimità della sorgente del campo, e cioè la sfera in questione. La scelta di un corpo di prova, caricato positivamente anziché negativamente, è soltanto convenzionale e non ha altro scopo che quello di stabilire il senso da darsi alle frecce delle linee di forza.



Il nuovo modello è simile a quello di un campo gravitazionale (p. 126) per via dell'analogia fra la legge di Coulomb e quella di Newton. L'unica differenza fra i due modelli è che le frecce puntano in direzioni opposte. V'è infatti repulsione fra due cariche positive, mentre v'è attrazione fra due masse. In cambio, il campo di una sfera di carica negativa sarà identico a un campo gravitazionale, poiché la nostra piccola carica di prova essendo positiva verrà attirata dalla sorgente del campo come nel disegno alla pagina seguente. Se al piccolo corpo di prova, carico di elettricità, sostituiamo un polo magnetico e lo collochiamo in prossimità di un conduttore carico (la sfera del nostro esempio) non noteremo azione reciproca alcuna, fin tanto che l'uno e l'altro rimangono a riposo. Traducendo questo fatto nel linguaggio del campo, potremo dire: un *campo elettrostatico*



non influisce su un *campo magnetostatico* e viceversa. L'espressione «campo statico» significa un campo che non varia con il tempo. Magneti e cariche, anche se vicinissimi gli uni alle altre, rimarrebbero in riposo per l'eternità, ove non intervenissero forze esterne perturbatrici. I campi elettrostatici, magnetostatici e gravitazionali hanno caratteri del tutto diversi. Essi sono inconfondibili; ognuno di essi conserva la propria individualità, indipendentemente dagli altri.

Torniamo alla nostra sfera elettrica, che finora abbiamo considerata in riposo e supponiamo che cominci a muoversi, per effetto di una forza esterna. La sfera carica è in moto. Nel linguaggio del campo, questa proposizione suona così: il campo della carica elettrica varia nel tempo. Ma, come ha insegnato Rowland, il movimento della nostra sfera elettrica equivale a una corrente. Sappiamo altresì che ogni corrente è accompagnata da un campo magnetico. Il nostro ragionamento s'incatena dunque come segue:

moto della carica	→	variazione di un campo elettrico
↓ corrente	→	campo magnetico associato.

Pertanto concluderemo: *la variazione di un campo elettrico, prodotta dal moto di una carica, è sempre accompagnata da un campo magnetico.*

La nostra conclusione si basa sull'antico esperimento di Oersted, ma è di portata molto maggiore. Essa implica il riconoscimento che



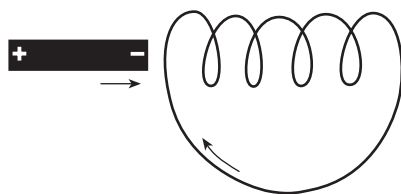
l'associazione di un campo elettrico, variabile nel tempo, con un campo magnetico è essenziale per l'ulteriore svolgimento dei nostri ragionamenti.

Finché una carica rimane in riposo, c'è soltanto un campo elettrostatico. Ma un campo magnetico appare non appena la carica comincia a muoversi. Possiamo dire di più. Il campo magnetico prodotto dal moto della carica sarà tanto più forte, quanto più forte sarà la carica e più veloce il suo movimento. Anche questa è una conseguenza dell'esperimento di Rowland. Ricorrendo di nuovo al linguaggio del campo possiamo dire: *quanto più rapidamente varia il campo elettrico, tanto più forte è il campo magnetico associato.*

Abbiamo fin qui provato a tradurre nel nuovo linguaggio del campo fatti già descritti nel linguaggio dei fluidi, modulato sull'antica interpretazione meccanicistica. Vedremo tra breve come il nostro nuovo linguaggio sia chiaro, istruttivo e gravido di conseguenze.

## I due pilastri della teoria del campo

Dunque: «la variazione di un campo elettrico è accompagnata da un campo magnetico». Se scambiamo le parole «magnetico» ed «elettrico» ne risulta la proposizione: *la variazione di un campo magnetico è accompagnata da un campo elettrico*. Soltanto un esperimento può decidere se la proposizione è vera. Comunque, l'idea di formulare questo nuovo problema è suggerita dall'uso del linguaggio del campo.



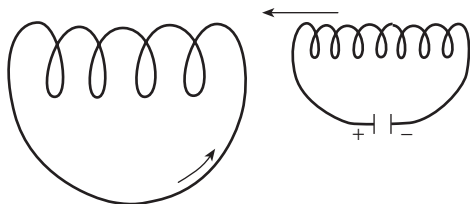
Poco più di cento anni fa, Faraday fece un esperimento che condusse alla grande scoperta delle *correnti indotte*.

La dimostrazione è molto semplice. Occorre soltanto un solenoide (o un altro circuito qualsiasi), un magnete lineare e uno dei tanti apparecchi di diverso tipo che si usano per accertare la presenza di una corrente elettrica. Per cominciare, una barretta magnetica è tenuta in riposo vicino a un circuito chiuso, diciamo un solenoide. Nessuna corrente circola nel filo, poiché non c'è nessuna sorgente che la produca. Infatti non c'è che il campo magnetostatico della sbarra magnetica, campo che non varia col tempo. Proviamo ora a modificare rapidamente la posizione del magnete, sia allontanan-

dolo, sia avvicinandolo al solenoide. Questo verrà immediatamente percorso da una corrente che dura un attimo e subito svanisce. La corrente riapparirà ogni qual volta modificheremo la posizione del magnete, come potremo verificare con un apparecchio sufficientemente sensibile. Che cosa significa una corrente dal punto di vista della teoria del campo? Essa significa l'esistenza di un campo elettrico che obbliga i fluidi elettrici a circolare nel filo. Corrente e campo elettrico svaniscono non appena il magnete torna a riposo.

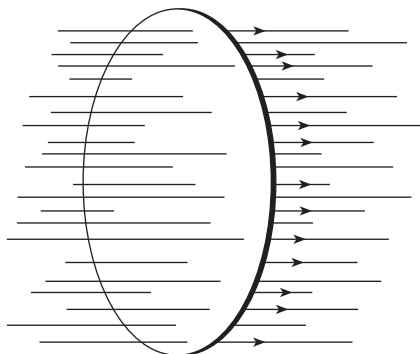
Supponiamo d'ignorare il linguaggio del campo e di dover descrivere questo esperimento, sia qualitativamente che quantitativamente, nel linguaggio degli antichi concetti meccanicistici. Il nostro esperimento ci si presenterebbe allora sotto l'aspetto seguente: il moto di un dipolo magnetico ha creato una forza che ha costretto il fluido elettrico a circolare nel filo. Dovremmo perciò domandarci: da che cosa dipende questa forza? Ma sarebbe estremamente difficile rispondere. Occorrerebbe infatti indagare se e come la forza dipenda sia dalla velocità e forma del magnete, sia dalla forma del circuito. Va aggiunto che l'interpretazione di questo esperimento per mezzo dell'antico linguaggio non ci procura la minima indicazione sulla possibilità di suscitare una corrente indotta anche in modo diverso, vale a dire mediante il moto di un altro circuito percorso da una corrente, anziché mediante il moto di una sbarra magnetica.

Le cose vanno altrimenti se usiamo il linguaggio del campo e se continuiamo a fare affidamento sul principio che l'azione è determinata dal campo. Ci rendiamo subito conto che un solenoide percorso da una corrente può benissimo sostituire una sbarra magnetica. Il disegno seguente mostra due solenoidi; uno piccolo nel quale circola una corrente e l'altro più grande nel quale l'eventuale corrente indotta può venire accertata. Muovendo il piccolo solenoide percorso dalla corrente, così come prima muovevamo la sbarra ma-



gnetica, creeremo effettivamente una corrente indotta nel solenoide più grande. Otterremo ancora gli stessi effetti e cioè potremo alternativamente creare e distruggere un campo magnetico e la sua corrente indotta, se invece di muovere il piccolo solenoide gli diamo e gli togliamo alternativamente la corrente, manovrando un interruttore. L'esperimento conferma nuovamente coi fatti le congetture suggerite dalla teoria del campo!

Ricorriamo a un esempio ancora più semplice. Prendiamo soltanto il filo formante circuito chiuso, senza sorgente di corrente. Creiamo in prossimità un campo magnetico, sia mediante un circuito percorso da una corrente elettrica, sia mediante una sbarra magnetica. La descrizione tanto qualitativa, come quantitativa dei fenomeni d'induzione che possono così prodursi risulta oltremodo semplice ricorrendo al linguaggio del campo. Il disegno mostra il filo e le linee di forza magnetiche che attraversano la superficie da esso delimitata. Sono queste le sole linee di forza che dobbiamo prendere in considerazione. Non si manifesterà corrente nel circuito, per grande che sia la forza del campo magnetico, fin tanto che questo non varia. Ma una corrente comincerà a circolare nel filo non appena si verificherà una variazione nel numero delle linee di forza che attraversano la superficie contornata dal filo stesso. La corrente è suscitata dalla variazione – comunque prodotta – del numero di linee che attraversano detta superficie. Tale variazione è l'unico concetto essenziale per la descrizione sia qualitativa che quantitativa della corrente indotta. «Il numero delle linee varia»



vuol dire che la densità delle linee varia e – come sappiamo già – ciò significa altresì che la forza del campo varia.

Rammentando l'equivalenza fra carica in moto e corrente, vediamo che gli anelli principali, nella catena dei nostri ragionamenti, sono: variazione del campo magnetico → corrente indotta → movimento della carica → esistenza di un campo elettrico.

Pertanto: *un campo magnetico variante è accompagnato da un campo elettrico.*

Abbiamo così trovato i due principali pilastri di sostegno della teoria del campo elettrico e magnetico.

Il primo connette campo elettrico variante e campo magnetico. Come abbiamo visto, tale legame venne messo in luce dall'esperimento di Oersted sulla deviazione dell'ago magnetico e condusse alla conclusione: *un campo elettrico variante è accompagnato da un campo magnetico.* Il secondo connette il campo magnetico mutevole con la corrente indotta e venne rivelato dall'esperimento di Faraday. Su questi due pilastri si appoggia la descrizione quantitativa dei fenomeni.

Anche il campo elettrico accompagnante un campo magnetico variante appare come qualcosa di reale. Ricordiamo che sopra abbiamo dovuto ammettere l'esistenza del campo magnetico di una corrente anche in assenza di un magnete di prova. Adesso dobbiamo ammettere che il campo elettrico esiste anche in mancanza del circuito necessario per accertare la presenza di una corrente indotta.

I nostri due pilastri sarebbero in verità riducibili a un solo, a quello cioè fondato sull'esperimento di Oersted, potendosi da questo dedurre le conseguenze dell'esperimento di Faraday con l'aiuto della legge sulla conservazione dell'energia. Tuttavia il ricorso ai due pilastri consente una maggior chiarezza ed economia di esposizione.

Dobbiamo ancora menzionare un'ulteriore conseguenza della rappresentazione del campo. Consideriamo un circuito, percorso da una corrente, la cui sorgente sia ad esempio una pila voltaica. Supponiamo che il collegamento fra il filo del circuito e la sorgente della corrente venga improvvisamente interrotto. Naturalmente la corrente cesserà di circolare. Ma al momento dell'interruzione si svolge un processo piuttosto intricato, sebbene anch'esso prevedibile in base alla teoria del campo. Prima dell'interruzione della corrente esisteva un campo magnetico attorniante il filo. Questo campo ces-

sa di esistere con l'interruzione della corrente. Pertanto il numero delle linee di forza attraversanti la superficie delimitata dal circuito subisce una fortissima e rapidissima variazione. Ma una simile variazione, comunque causata, deve creare una corrente indotta. Ciò che realmente conta è l'entità della variazione del campo magnetico; quanto maggiore essa è, e tanto più forte sarà la corrente indotta. Qui abbiamo un'ulteriore prova in appoggio alla teoria. L'interruzione di una corrente deve venir accompagnata dall'apparizione di una forte corrente indotta che dura un solo istante. L'esperimento conferma di nuovo la predizione. Chiunque abbia avuto occasione d'interrompere una corrente avrà notato che si produce una scintilla. Questa scintilla rivela la grande differenza di potenziale causata dalla rapida variazione del campo magnetico.

Lo stesso processo può venir considerato da un altro punto di vista, quello dell'energia. Un campo magnetico scompare e scocca una scintilla. Una scintilla rappresenta energia e pertanto anche il campo magnetico deve rappresentare energia. Per adoperare coerentemente il concetto di campo e il suo linguaggio dobbiamo dunque considerare il campo magnetico come una riserva di energia. Soltanto così saremo in grado di rappresentare i fenomeni elettrici e magnetici in accordo con la legge della conservazione dell'energia.

Usato da principio come un utile modello soltanto, il campo è andato sempre più assumendo aspetto reale. Ci ha aiutato a capire fatti già noti e ce ne ha additato dei nuovi. Attribuire energia al campo significa fare un ulteriore passo avanti lungo la via che ci ha portati a dare sempre maggior consistenza al concetto di campo e a lasciare via via più in disparte il concetto di sostanza, così essenziale per il punto di vista meccanicistico.

## Realtà del campo

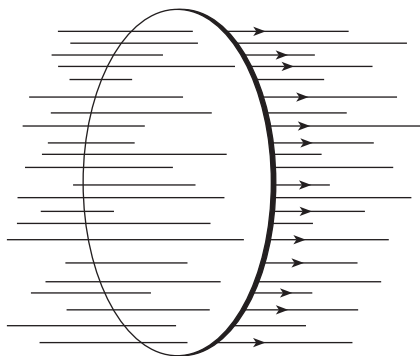
La definizione quantitativa, ovvero matematica, del campo si riassume nelle equazioni che portano il nome di Maxwell. Sono i fatti menzionati fin qui che condussero all'impostazione di queste equazioni, il cui contenuto è assai più ricco di quanto possa sembrare così dal nostro esposto, come dalla loro forma. Questa è bensì molto semplice, ma cela profondità che soltanto uno studio accurato può rivelare.

La formulazione di queste equazioni costituisce l'avvenimento più importante verificatosi in fisica dal tempo di Newton in poi e ciò, non soltanto per la dovizia del loro contenuto, ma anche perché esse hanno fornito il modello di un nuovo tipo di legge.

I caratteri essenziali delle equazioni di Maxwell, caratteri condivisi da tutte le altre equazioni della fisica moderna, possono riassumersi in una breve proposizione e cioè: *le equazioni di Maxwell sono leggi* che definiscono la *struttura del campo*.

Perché mai le equazioni di Maxwell differiscono nella forma e nel carattere dalle equazioni della meccanica classica? Che cosa intendiamo dire asserendo che queste equazioni definiscono la struttura del campo? Com'è mai possibile che in base ai risultati degli esperimenti così semplici di Oersted e di Faraday si sia giunti a formulare un nuovo tipo di legge e di così grande importanza per lo sviluppo ulteriore della fisica?

Con l'esperimento di Oersted abbiamo visto che un campo magnetico si avvita intorno a un campo elettrico variante. L'esperimento di Faraday ci ha invece mostrato che un campo elettrico si avvita intorno a un campo magnetico variante. Ai fini di tratteggiare alcuni degli aspetti caratteristici della teoria di Maxwell,



cominciamo col concentrare tutta la nostra attenzione su uno soltanto di questi esperimenti, quello cioè di Faraday. Ripetiamo il disegno che ci servì per illustrare il fenomeno della corrente elettrica indotta da un campo magnetico variante. Abbiamo visto che una corrente indotta appare ogni qual volta si verifica una variazione nel numero delle linee di forza attraversanti la superficie contornata dal filo. Perciò la corrente si manifesterà sia se il campo magnetico varia, sia se il circuito viene deformato o mosso, vale a dire non appena il numero delle linee magnetiche attraversanti detta superficie varia, indipendentemente dalle cause della variazione. Qualora volessimo prendere in considerazione tutte queste diverse possibilità e discuterne le rispettive influenze, saremmo fatalmente condotti a una teoria assai complicata. Ma non è forse possibile semplificare il nostro problema? Proviamo a eliminare dalle nostre considerazioni tutto ciò che può avere attinenza con la forma del circuito, con la sua lunghezza, con la superficie racchiusa dal filo. Immaginiamo cioè che il circuito del nostro ultimo disegno diventi sempre più piccolo, riducendosi gradualmente a un minutissimo circuito avvolgente un punto nello spazio. In tal caso tutto quanto concerne forma e dimensioni non ha più nessuna importanza. In questo processo di contrazione, secondo cui il circuito chiuso si riduce a un punto, dimensioni e forma svaniscono automaticamente e si possono perciò formulare leggi governanti le variazioni del campo magnetico ed elettrico in un qualsiasi punto dello spazio e in un qualsiasi istante.



È questo uno dei principali passi che conducono alle equazioni di Maxwell. Esso consiste nuovamente in un esperimento ideale e cioè nella ripetizione immaginaria dell'esperimento di Faraday, con un circuito ridotto a un punto.

In realtà si tratta piuttosto di un mezzo passo che di uno intero. Non basta prendere in considerazione l'esperimento di Faraday soltanto. Anche l'altro pilastro della teoria del campo, quello basato sull'esperimento di Oersted va considerato con gli stessi criteri. In questo esperimento le linee di forza magnetiche si avvolgono intorno alla corrente. Riducendo le spire delle linee magnetiche di forza a un punto, faremo il secondo mezzo passo e l'intero passo ci fornirà la relazione fra le reciproche variazioni dei campi magnetici ed elettrici in un qualsiasi punto dello spazio, in qualsivoglia istante.

Dobbiamo ora fare un secondo passo essenziale. Nell'esperimento di Faraday occorre un circuito chiuso per verificare l'esistenza del campo elettrico, così come occorre un polo o un ago magnetico nell'esperimento di Oersted per accertare l'esistenza di un campo magnetico. Ma la nuova idea teorica di Maxwell va oltre questi fatti sperimentali. Nella teoria di Maxwell il campo elettrico e magnetico, altrimenti detto il campo *elettromagnetico*, è qualcosa di reale. Il campo elettrico è generato da un campo magnetico variante, indipendentemente dalla presenza di un filo per accertarne l'esistenza, così come un campo magnetico è generato da un campo elettrico variante, anche se manca un polo magnetico per constatarlo.

I passi essenziali che conducono alle equazioni di Maxwell sono dunque due. Con il primo passo il circuito del campo magnetico, che negli esperimenti di Oersted e di Rowland si avvita intorno alla corrente e al campo elettrico variante, deve venir ridotto a un punto e così pure il circuito del campo elettrico che, nell'esperimento di Faraday, si avvolge intorno al campo magnetico variante. Il secondo passo consiste nel riconoscere il campo come qualcosa di reale; una volta creato, il campo elettromagnetico sussiste, agisce e varia in conformità alle leggi di Maxwell.

Le equazioni di Maxwell definiscono la struttura del campo elettromagnetico. Sono leggi valide nell'intero spazio e non soltanto nei punti in cui materia o cariche elettriche sono presenti, com'è il caso per le leggi meccaniche.

Rammentiamo come stanno le cose in meccanica. Conoscendo posizione e velocità di una particella, in un dato istante, e conoscendo inoltre le forze agenti su di essa, è possibile prevedere l'intero futuro percorso della particella stessa. Nella teoria di Maxwell invece basta conoscere il campo in un dato istante per poter dedurre dalle equazioni omonime in qual modo l'intero campo varierà nello spazio e nel tempo. Le equazioni di Maxwell permettono di seguire le vicende del campo, così come le equazioni della meccanica consentono di seguire le vicende di particelle materiali.

Ma fra le leggi della meccanica e quelle di Maxwell sussiste un'ulteriore differenza essenziale. Un confronto fra le leggi di gravitazione di Newton e le leggi del campo di Maxwell porrà in rilievo alcuni dei tratti caratteristici di queste ultime e delle rispettive equazioni.

Mediante le leggi di Newton possiamo dedurre il moto della Terra, dalla forza agente fra Sole e Terra. Dette leggi collegano il moto della nostra Terra con il lontano Sole. Benché così distanti l'una dall'altro, Terra e Sole prendono entrambi parte allo spettacolo delle forze agenti, in qualità di attori.

Nella teoria di Maxwell non vi sono attori materiali. Le equazioni matematiche di questa teoria esprimono le leggi governanti il campo elettromagnetico. Non collegano, come nelle leggi di Newton, due eventi separati da una grandissima distanza; non collegano ciò che succede «qui» con le condizioni imperanti «là». Il campo «qui» e «ora» dipende dal campo dell'*immediata vicinanza* e nell'istante *appena trascorso*. Le equazioni del campo consentono di predire ciò che avverrà un poco più distante nello spazio e un poco più tardi nel tempo, se sappiamo ciò che avviene qui e ora. Esse ci mettono in grado di estendere a piccolissimi passi la nostra conoscenza del campo. Sommando tutti questi piccoli passi, possiamo dedurre ciò che succede qui da ciò che avviene a grande distanza. Nella teoria di Newton, in cambio, non si hanno che lunghi passi fra eventi distanti. Gli esperimenti di Oersted e di Faraday possono dedursi dalla teoria del campo elettromagnetico, ma soltanto sommando tanti piccoli passi, ognuno dei quali è governato dalle equazioni di Maxwell.

Uno studio matematico più approfondito di queste equazioni mostra che se ne possono trarre nuove e inattese conclusioni e che l'in-

tera teoria può così venir messa a più decisiva prova, in quanto si tratta di conclusioni aventi carattere quantitativo e discendenti da un'intera catena di argomenti logici.

Ricorriamo di nuovo a un esperimento ideale. Una piccola sfera dotata di carica elettrica è obbligata da un qualsiasi dispositivo esterno a oscillare rapidamente e ritmicamente a mo' di pendolo. Come possiamo descrivere tutto ciò che avviene in tal caso valendoci del linguaggio del campo e di tutto quanto sappiamo sulle variazioni del campo?

L'oscillazione della carica genera un campo elettrico variante, che è sempre accompagnato da un campo magnetico variante. Se un filo formante circuito chiuso viene collocato in vicinanza, il campo magnetico variante verrà a sua volta accompagnato da una corrente elettrica nel circuito. Tutto ciò suona come una ripetizione di fatti già noti; ma lo studio delle equazioni di Maxwell permette di vedere assai più addentro nel problema della carica oscillante. Deduzioni matematiche basate sulle equazioni stesse ci consentono di riconoscere i caratteri generali del campo avvolgente una carica oscillante e più precisamente tanto le sue modificazioni strutturali in relazione alla sua distanza dalla sorgente, come le sue variazioni nel tempo. Il frutto di tali deduzioni è l'*onda elettromagnetica*. Energia irradia dalla carica oscillante e attraversa lo spazio con una velocità determinata. Ma il trasferimento di energia, il moto cioè di uno stato, è la caratteristica di tutti i fenomeni ondulatori.

Abbiamo già visto differenti tipi di onde. Ricordiamo l'onda longitudinale suscitata da una sfera pulsante, per cui variazioni di densità si diffondono in un mezzo fluido. Ricordiamo altresì le onde trasversali prodotte in un mezzo simile a gelatina, ossia le deformazioni causate dalle oscillazioni rotatorie di una sfera che si propagano attraverso il mezzo stesso. Di quale specie sono le variazioni che si propagano nel caso di un'onda elettromagnetica? Esse non sono altro che le variazioni di un campo elettromagnetico! Ogni variazione di un campo elettrico genera un campo magnetico; ogni variazione di un campo magnetico genera un campo elettrico; ogni variazione di... e così via. E siccome il campo rappresenta energia, tutte queste variazioni che si diffondono nello spazio, con una velocità determinata, producono un'onda. Le linee di forza elettriche e quelle magnetiche giacciono, come risulta dalla teoria, in piani per-

pendicolari alla direzione della propagazione. Pertanto l'onda è trasversale. La rappresentazione del campo conserva quindi i tratti caratteristici desumibili dagli esperimenti di Oersted e di Faraday, ancorché essa rivesta significato più profondo.

L'onda elettromagnetica si propaga nello spazio vuoto. È questa una conseguenza della teoria. Se la carica oscillante cessa improvvisamente di muoversi, il suo campo diventa elettrostatico; ma le serie successive di onde create dall'oscillazione continuano a propagarsi. Le onde conducono un'esistenza indipendente e la storia delle loro variazioni può venir seguita come quella di un qualsiasi oggetto materiale.

È facile intendere come la nostra rappresentazione di un'onda elettromagnetica che si propaga con una data velocità nello spazio e che varia nel tempo possa desumersi dalle equazioni di Maxwell. Queste infatti definiscono il campo elettromagnetico in qualsiasi punto dello spazio e in qualsiasi istante.

Resta da chiarire un'altra questione molto importante. Con quale velocità l'onda elettromagnetica si diffonde nello spazio? La teoria, con il suffragio di alcuni dati desumibili da esperimenti assai semplici e che non hanno nulla a che fare con la propagazione di onde, dà una risposta esplicita: *la velocità di un'onda elettromagnetica è uguale a quella della luce.*

Sono i semplici esperimenti di Oersted e di Faraday che servono di base alla costruzione delle leggi di Maxwell e tutti i risultati fin qui menzionati sono conseguenze di queste leggi, enunciate nel linguaggio del campo. Fra tali risultati quello della scoperta teorica dell'onda elettromagnetica propagantesi con la velocità della luce costituisce una delle maggiori conquiste del pensiero che la storia della scienza registri.

L'esperimento confermò le predizioni della teoria. Cinquant'anni fa, Hertz riuscì per primo a fornire la prova dell'esistenza di onde elettromagnetiche e a dimostrare sperimentalmente che la loro velocità è uguale a quella della luce. Oggi milioni di persone sperimentano quotidianamente con onde elettromagnetiche emesse e ricevute. I loro apparecchi sono assai più complicati di quello usato da Hertz e captano onde la cui sorgente non dista pochi metri soltanto, bensì migliaia di chilometri.

## Campo ed etere

L'onda elettromagnetica è trasversale e si propaga con la velocità della luce nel vuoto. Il fatto che la velocità sia identica suggerisce l'esistenza di una stretta parentela fra fenomeni ottici ed elettromagnetici.

Quando ci siamo trovati a dover scegliere fra la teoria corpuscolare e quella ondulatoria, abbiamo deciso per la teoria ondulatoria. La diffrazione della luce è stato l'argomento che ha influito maggiormente sulla nostra decisione. Ma non cadremo in contraddizione con nessuna spiegazione dei fatti ottici, ammettendo altresì che *l'onda luminosa sia di natura elettromagnetica*. Potremo anzi trarne nuove conclusioni poiché in tal caso fra proprietà ottiche ed elettriche della materia devono esistere relazioni deducibili dalla teoria. Il fatto che conclusioni di tal genere possono effettivamente trarsi e che ricevono conferma sperimentale costituisce un argomento inoppugnabile in favore della teoria elettromagnetica della luce. Questo grande risultato è dovuto alla teoria del campo. Due rami della scienza, considerati a lungo come estranei, rientrano così nell'ambito di una stessa teoria. Le equazioni di Maxwell per l'induzione elettrica e per la rifrazione ottica sono identiche. Se il nostro fine è quello di descrivere con il sussidio di una sola teoria tutto ciò che può essere accaduto o che può accadere, dobbiamo riconoscere che l'unione fra ottica ed elettricità costituisce indubbiamente un gran passo avanti. Dal punto di vista fisico, l'unica differenza fra un'ordinaria onda elettromagnetica e un'onda luminosa è la lunghezza d'onda: questa, molto piccola per le onde luminose percepite dall'occhio umano, è invece assai grande per le ordinarie onde elettromagnetiche catturate da un ricevitore radiofonico.

L'antico criterio meccanicistico tendeva a ridurre tutti gli eventi della natura a forze agenti fra particelle materiali. Su questo criterio si basa la primitiva e ingenua teoria dei fluidi elettrici. Per il fisico dei primi anni del XIX secolo il campo non esisteva. Egli considerava come reali soltanto la sostanza e le sue modificazioni e tentava di descrivere l'azione di due cariche elettriche unicamente mediante concetti afferenti direttamente alle cariche stesse.

Al principio il concetto di campo non fu altro che uno strumento volto ad agevolare la comprensione dei fenomeni dal punto di vista meccanico. Ma nel nuovo linguaggio del campo l'essenziale per la comprensione dell'azione fra le due cariche è la descrizione del campo interposto fra di esse e non già le cariche stesse. L'accettazione del nuovo concetto si affermò progressivamente, e finalmente il campo lasciò in ombra la sostanza. Ci si accorse allora che qualcosa di molto importante era avvenuto in fisica. Si era creata una nuova realtà, un nuovo concetto che non trovava posto nello schema meccanicistico. Lentamente e non senza lotta, il concetto di campo finì per occupare una posizione direttiva in fisica e ne costituisce tuttora uno dei concetti basilari. Per il fisico moderno il campo elettromagnetico è altrettanto reale quanto la sedia su cui siede.

Ma sarebbe ingiusto ritenere che il nuovo concetto di campo abbia liberato la scienza dagli errori dell'antica teoria dei fluidi elettrici, o ancora che la nuova teoria annulli le conquiste dell'antica. La nuova teoria mette in luce tanto i pregi, quanto le deficienze dell'antica e ci permette di ritrovare i nostri concetti anteriori, a un livello superiore. Ciò è vero non soltanto nei riguardi della teoria dei fluidi elettrici e del campo, ma altresì nei riguardi di tutte le innovazioni introdotte nelle teorie fisiche, per rivoluzionarie che sembrano. Nel nostro caso, ad esempio, ritroviamo il concetto della carica elettrica anche nella teoria di Maxwell, ancorché la carica vi sia intesa soltanto come sorgente di un campo elettrico. La legge di Coulomb è sempre valida ed è contenuta nelle equazioni di Maxwell, dalle quali può dedursi come una delle molte conseguenze. Possiamo tuttora applicare la vecchia teoria, ogni qual volta si abbia a investigare fatti che non escono dai limiti della sua validità. Ma possiamo anche applicare la nuova teoria, giacché tutti i fatti conosciuti rientrano nell'ambito della validità di quest'ultima.

Ricorrendo a un confronto potremmo dire che creare una nuova teoria non è come demolire una vecchia tettoia per sostituirla con un grattacielo. È piuttosto come inerpicarsi su per una montagna, raggiungendo nuovi e più vasti orizzonti e scoprendo inattesi rapporti fra il nostro punto di partenza e le bellezze dei suoi dintorni. Tuttavia, il sito dal quale siamo partiti è sempre lì e possiamo ancora scorgerlo, ancorché sembri più piccolo e non sia ormai più che un dettaglio, nella vasta veduta, raggiunta superando gli ostacoli che si opponevano alla nostra ascesa avventurosa.

Occorse molto tempo prima che tutto il contenuto della teoria di Maxwell venisse riconosciuto. Il campo fu da prima considerato come qualcosa che, più tardi, avrebbe potuto interpretarsi meccanicisticamente, con il sussidio dell'etere. Quando si riconobbe che questo programma non poteva realizzarsi, la teoria del campo aveva ormai condotto a conquiste così brillanti e importanti, da non poter più essere sostituita dal dogma meccanicistico. D'altra parte, il problema di costruire un plausibile modello meccanico dell'etere andava continuamente perdendo di interesse, tanto più che, in ragione del carattere artificioso e forzato delle congetture cui bisognava ricorrere, il risultato appariva sempre meno incoraggiante.

L'unica nostra via d'uscita sembra essere quella di tener per certo il fatto che lo spazio possiede la proprietà fisica di trasmettere le onde elettromagnetiche, senza troppo preoccuparci del significato di questa affermazione. Possiamo magari continuare a usare la parola etere, ma soltanto al fine di designare una particolare proprietà dello spazio. Nel corso dell'evoluzione della scienza la parola etere ha più volte cambiato significato. Attualmente non sta più a denotare un mezzo formato di particelle. La sua storia, ancora non terminata, si prolunga nella teoria della relatività.

## Il sistema di riferimento

Giunti a questa pagina del nostro romanzo, dobbiamo tornare al punto di partenza e cioè alla legge d'inerzia di Galileo. Citiamola nuovamente:

Ogni corpo persevera nel proprio stato di riposo o di movimento uniforme e rettilineo, a meno che non sia costretto a modificare tale stato, da forze agenti su di esso.

Una volta inteso il concetto d'inerzia, ci si stupisce che possa esserci ancora qualcosa da dire in proposito. Ma benché già discusso a fondo, il problema è tutt'altro che esaurito.

Immaginiamo un fisico il quale ritenga che la legge d'inerzia possa venir provata o refutata mediante esperimenti reali. Spingerà delle piccole sfere su una tavola orizzontale, cercando di eliminare il più possibile l'attrito e constaterà che più la tavola e le sfere sono lisce e più il movimento diviene uniforme. Ma proprio quando sta per confermare il principio d'inerzia, un burlone gli fa un brutto scherzo. Il nostro fisico lavora in una stanza senza finestre e non ha modo di comunicare con il mondo esterno. Il burlone installa un meccanismo con il quale può imprimere alla stanza un rapido movimento di rotazione intorno a un asse passante per il centro. Non appena la rotazione comincia, il nostro fisico constata fatti nuovi e inattesi. Le sfere, che prima si muovevano uniformemente, tendono ora ad allontanarsi dal centro della stanza e a avvicinarsi il più possibile alle pareti. Egli stesso sente che una strana forza lo spinge verso la parete. Prova inoltre la stessa sensazione di chi percorre a gran velocità una curva in treno o in auto, o meglio ancora di chi gira in una giostra. Tutti i risultati che egli ha acquisito vanno in fumo.



Il nostro fisico si vedrebbe costretto ad abbandonare la legge d'inerzia e con essa tutte le leggi della meccanica. La legge d'inerzia costituiva il suo punto di partenza; se essa subisce modificazioni, tutte le conclusioni trattene si modificano anch'esse. Un osservatore costretto a passare tutta la vita in una stanza rotante e a farvi tutti i suoi esperimenti perverrebbe a leggi meccaniche diverse dalle nostre. Ma sempre che entri nella stanza munito di cognizioni profonde e di ferma fede nei principi della fisica, egli potrà spiegare il crollo apparente della meccanica ricorrendo alla supposizione che la stanza ruoti. Mediante esperimenti meccanici potrà anche riuscire a sapere come essa ruoti.

Perché mai dobbiamo interessarci tanto dell'osservatore nella sua stanza rotante? Semplicemente perché sulla nostra Terra siamo fino a un certo punto nella stessa situazione. Dall'epoca di Copernico sappiamo che la Terra ruota intorno al proprio asse e gira intorno al Sole. In verità anche questa idea, così semplice e chiara a tutti, non ha potuto sottrarsi al progresso della scienza, ma per ora non toccheremo questo tasto e accetteremo l'opinione di Copernico. Se il nostro osservatore nella stanza rotante non fosse in grado di confermare le leggi della meccanica, neanche noi, sulla nostra Terra, potremmo farlo. La rotazione della Terra è però relativamente lenta, cosicché l'effetto è poco notevole. Vi sono tuttavia molti esperimenti che rivelano una leggera discrepanza con le leggi meccaniche e la loro coerenza può venir considerata come una prova della rotazione della Terra.

Sfortunatamente non possiamo collocarci fra il Sole e la Terra per provare la validità rigorosa della legge d'inerzia e per osservare il movimento terrestre. Non possiamo farlo che con il pensiero. Tutti i nostri esperimenti devono effettuarsi sulla Terra, dove siamo costretti a vivere. Questo stesso fatto può esprimersi più scientificamente nei termini seguenti: *la Terra è il nostro sistema di coordinate*.

Per mettere in luce il significato di queste parole ricorreremo a un esempio semplice. Siamo in grado di prevedere la posizione che una pietra, lasciata cadere dalla cima di una torre, occuperà in un istante qualsiasi. Siamo altresì in grado di confermare le nostre previsioni mediante l'osservazione. Collocando accanto alla torre un'asta graduata si può sempre prevedere con quale marca dell'asta il corpo in caduta coinciderà in un dato istante. È evidente che tanto la tor-

re quanto l'asta non devono consistere di materie suscettibili di subire un cambiamento qualsiasi durante l'esperimento. In linea di principio, un'asta indeformabile, rigidamente fissata alla Terra, e un orologio perfetto è tutto ciò che occorre per eseguire l'esperimento. Disponendo di questi strumenti possiamo anche ignorare la presenza della torre. Le supposizioni che precedono sono tutte banali e non vengono solitamente enunciate nella descrizione di simili esperimenti. Ma questa analisi vuole precisamente mostrare quante premesse si celino dietro ognuna delle nostre affermazioni. Nel nostro caso abbiamo supposto l'esistenza di un'asta rigida e di un orologio ideale, strumenti senza i quali non sarebbe possibile verificare la legge galileiana della caduta dei corpi. Con questa attrezzatura fisica, semplice ma fondamentale, siamo in grado di confermare detta legge meccanica con un certo grado di esattezza. Eseguito molto accuratamente, l'esperimento rivela però una discordanza con la teoria, discordanza dovuta alla rotazione della Terra, o in altri termini al fatto che le leggi della meccanica, così come le abbiamo enunciate fin qui, non sono rigorosamente valide in un sistema di coordinate rigidamente collegato alla Terra.

In tutti gli esperimenti meccanici, di qualsiasi genere essi siano, si tratta sempre di determinare la posizione di punti materiali, in un dato istante del tempo, pressappoco come nell'esperimento sulla caduta dei corpi. Ma la posizione deve essere sempre determinata rispetto a qualche cosa; rispetto alla torre o all'asta se, a titolo di esempio, ci riportiamo al nostro esperimento.

Per poter determinare la posizione dei corpi, dobbiamo dunque valerci di ciò che si chiama un *sistema di riferimento*. Al descrivere le posizioni degli oggetti e degli uomini in una città, le strade e le piazze costituiscono il sistema al quale noi le riferiamo. Parlando delle leggi della meccanica, non ci siamo finora preoccupati d'indicare un sistema di riferimento, perché vivendo sulla Terra nulla c'impedisce di servirci in qualsiasi caso di un sistema di riferimento rigidamente collegato alla Terra. Questo sistema, idealmente costituito da aste rigide invariabili, e al quale noi riferiamo tutte le nostre osservazioni, si chiama *sistema di coordinate*. Dovendo usare molto spesso questa espressione scriveremo semplicemente SC.

Finora tutte le nostre affermazioni concernenti i fenomeni fisici presentavano una lacuna. Non avevamo tenuto conto del fatto che

tutte le osservazioni devono farsi in un determinato SC. Invece di fornire una descrizione di tale SC, trascuravamo la sua esistenza. Quando, ad esempio, scrivevamo: «un corpo si muove uniformemente...» avremmo in realtà dovuto scrivere: «un corpo si muove uniformemente, relativamente a un determinato SC...». La nostra avventura con la stanza in rotazione ci ha insegnato che i risultati degli esperimenti meccanici possono dipendere dall'SC prescelto.

Se due SC effettuano un movimento di rotazione l'uno rispetto all'altro, le leggi della meccanica non possono essere valide per entrambi. Se la superficie dell'acqua in un bacino, scelta come uno di tali sistemi di riferimento, è orizzontale, quella in un bacino simile prende, nell'altro sistema, la forma concava, ben nota a chiunque rimescoli con un cucchiaino il proprio caffè.

Nel formulare le principali leggi della meccanica abbiamo dunque trascurato un punto importante. Abbiamo ommesso di stabilire per quale SC esse siano valide. Così tutta la meccanica classica resta campata in aria, in quanto non sappiamo a quale sistema vada riferita. Passiamo per il momento sopra questa difficoltà. Facciamo la supposizione, non del tutto corretta, che le leggi della meccanica siano valide per qualsiasi SC rigidamente collegato alla Terra. Facciamo ciò allo scopo di stabilire quale sia il nostro SC e di dare inoltre forma precisa alle nostre proposizioni. E benché l'affermazione che la Terra è un sistema di riferimento conveniente non sia del tutto corretta, l'ammetteremo provvisoriamente.

Con ciò noi supponiamo l'esistenza di un SC per il quale le leggi della meccanica sono valide. Ma è esso il solo? Prendiamo come SC un treno, una nave o un aeroplano in moto rispetto alla Terra. Le leggi della meccanica sono forse valide anche per questi SC? Sappiamo positivamente che non lo sono sempre, per esempio quando un treno percorre celermente una curva, quando la nave è sbalottata dal temporale, o quando l'aeroplano scende in vite. Cominciamo con un esempio semplice. Chiamiamo «buono» un SC nel quale le leggi della meccanica sono valide. Supponiamo ora un altro SC che si muova uniformemente rispetto al «buono», e che potrebbe essere, ad esempio, un treno o una nave ideale che fili senza scosse e in linea retta, senza mai cambiare di velocità. L'esperienza quotidiana ci dice che anche questi altri sono «buoni», vale a dire che gli esperimenti effettuati su un treno o su una nave in

moto uniforme danno esattamente gli stessi risultati come sulla Terra. Ma se il treno s'arresta bruscamente o accelera bruscamente la sua marcia, oppure se il mare s'ingrossa, fatti insoliti si producono. Nel treno le valige saltano dalle reti, sulla nave tavole e sedie ballano e i passeggeri sono colpiti da mal di mare. Dal punto di vista fisico ciò significa semplicemente che le leggi della meccanica non possono più applicarsi a tali SC, vale a dire che essi sono divenuti degli SC «cattivi».

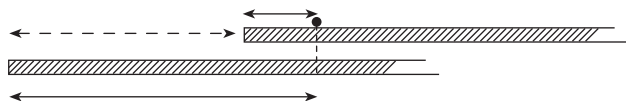
Questo risultato trova espressione nel cosiddetto *principio galileiano di relatività*: *se le leggi meccaniche sono valide per un dato SC, esse lo sono altresì per qualsiasi altro SC, in moto uniforme relativamente al primo.*

Se abbiamo due SC che si muovono non uniformemente l'uno rispetto all'altro, allora le leggi meccaniche non possono essere valide in entrambi. I «buoni» SC, vale a dire quelli per i quali le leggi meccaniche sono valide, li chiamiamo *sistemi inerziali*. La questione se esista o meno un sistema inerziale non è ancora decisa. Ma se uno di tali sistemi esiste dovrà esserne un numero infinito. Ogni SC in moto uniforme relativamente a quello iniziale è un SC inerziale.

Consideriamo il caso di due SC che si staccano da un punto dato e si muovono uniformemente l'uno rispetto all'altro con una data velocità. Coloro che preferiscono le immagini concrete possono pensare a una nave o a un treno in moto relativamente alla Terra. Bene, le leggi della meccanica trovano conferma sperimentale con lo stesso grado di esattezza tanto sulla Terra come sul treno o sulla nave in moto uniforme. Sorge tuttavia qualche difficoltà se osservatori appartenenti a due sistemi diversi prendono a discutere le loro osservazioni su uno stesso evento, dal punto di vista dei loro differenti SC. Ognuno di essi si esprimerà in modo diverso. Prendiamo un caso semplice: il moto di una particella sia osservato in due diversi SC e cioè la Terra e un treno in moto uniforme. Entrambi sono SC inerziali. Basta forse sapere ciò che è stato osservato in uno di questi SC per determinare ciò che è stato osservato nell'altro, sempre che le velocità relative e le posizioni dei due SC, in un dato istante, siano note? È di estrema importanza, nella descrizione degli eventi, sapere come passare da un SC all'altro, poiché i due SC sono equivalenti e ugualmente qualificati agli effetti della descri-

zione degli eventi naturali. E infatti basta conoscere i risultati ottenuti da un osservatore in uno degli *SC*, per arrivare a conoscere anche quelli ottenuti da un osservatore nell'altro *SC*.

Consideriamo ora il problema più astrattamente, senza servirci di treno o di nave, ma limitandoci al caso semplice del moto rettilineo. Immaginiamo un'asta rigida graduata e un buon orologio. Nel caso predetto l'asta rigida rappresenta un *SC*, tale e quale come quella collocata accanto alla torre nell'esperimento di Galileo. È più semplice e molto meglio lasciare da parte torri, muri, strade ecc. e rappresentarsi un *SC* sotto forma di un'asta rigida nel caso del moto rettilineo e sotto forma di una struttura rigida, formata da aste parallele e normali le une alle altre, nel caso del moto arbitrario.

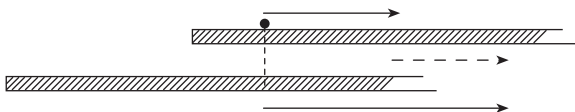


Supponiamo ora, per attenerci al caso più semplice, di avere due *SC* sotto forma di due aste rigide. Rappresentiamole in un disegno, l'una sopra all'altra, chiamandole rispettivamente *SC* «superiore» e *SC* «inferiore». Ammettiamo ora che i due *SC* si muovano con velocità determinata, l'uno relativamente all'altro, scivolando l'uno lungo l'altro. Per comodità ammetteremo inoltre che entrambe le aste siano di lunghezza infinita, e che possiedano un'origine ma non una fine. Un solo orologio basta per i due *SC*, poiché il flusso del tempo è il medesimo in entrambi. All'inizio delle nostre osservazioni le origini delle due aste coincidono. In quell'istante la posizione di un punto materiale qualsiasi è caratterizzata da uno stesso numero nei due *SC*. Il punto materiale coincide infatti con lo stesso tratto delle graduazioni che supponiamo incise su entrambe le aste. Abbiamo così un solo numero che determina la posizione del punto materiale. Ma dopo un certo tempo, mettiamo un secondo, i numeri corrispondenti alle posizioni saranno differenti, qualora le aste si muovano uniformemente l'una relativamente l'altra. Consideriamo ora un punto a riposo sull'asta superiore. Il numero determinante la sua posizione, nell'*SC* superiore non varia con il tempo;

varierà per contro il numero corrispondente sull'*SC* inferiore. Invece di parlare del numero corrispondente a una posizione del punto, diremo più brevemente la *coordinata di un punto*. Possiamo ora enunciare una proposizione che potrà sembrare molto involuta ma che il nostro disegno ci mostra essere corretta e sostanzialmente semplice. La coordinata di un punto nell'*SC* inferiore è uguale alla sua coordinata nell'*SC* superiore, più la coordinata del punto d'origine dell'*SC* superiore relativamente all'*SC* inferiore. È molto importante poter sempre calcolare la posizione di una particella in un *SC*, quando si conosca la sua posizione nell'altro. A tal fine occorre conoscere anche le posizioni relative dei due sistemi di coordinate a ogni istante. Tutto ciò può sembrare pedante ma in realtà la cosa è semplice e non meriterebbe una discussione così particolareggiata se non dovessimo servircene più avanti.

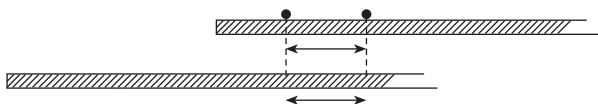
Convienne frattanto rilevare la diversità esistente fra la determinazione della posizione di un punto e la determinazione del tempo di un evento. Ogni osservatore si serve della propria asta costituente il proprio *SC*; ma c'è un solo orologio per tutti. Il tempo è qualcosa di «assoluto» che scorre allo stesso modo per tutti gli osservatori, in tutti gli *SC*.

Vediamo ora un altro caso. Un viaggiatore passeggia con una velocità di tre chilometri l'ora lungo il ponte di una grande nave. Questa è la sua velocità rispetto alla nave, o in altri termini relativamente a un *SC* rigidamente collegato alla nave. Se la velocità della nave è di trenta chilometri relativamente alla riva e se le velocità uniformi della nave e del viaggiatore hanno la stessa direzione, allora la velocità di quest'ultimo sarà di trentatré chilometri all'ora relativamente a un osservatore sulla riva, mentre è di tre chilometri all'ora relativamente alla nave. In forma più astratta: la velocità di un punto materiale, relativamente all'*SC* inferiore è uguale alla velocità del punto, relativamente all'*SC* superiore, più o meno la velocità dell'*SC* superiore, relativamente all'inferiore, a seconda che le velocità hanno direzioni uguali od opposte.



Vediamo dunque che possiamo sempre trasformare non soltanto le posizioni ma anche le velocità, onde passare da un *SC* all'altro, sempre che ci siano note le velocità relative dei due *SC*. Le posizioni o coordinate e le velocità costituiscono esempi di quantità che sono differenti in *SC* differenti, pur essendo connesse fra loro da certe *leggi di trasformazione*, assai semplici nel caso considerato.

Esistono però quantità che sono le stesse nei due *SC* e per le quali non occorrono leggi di trasformazione. Prendiamo, ad esempio, non più un punto soltanto, bensì due punti fissi sull'asta superiore e consideriamo la distanza che li separa. Questa distanza è la differenza fra le coordinate dei due punti. Per trovare le posizioni dei due punti relativamente a *SC* differenti dobbiamo servirci delle leggi di trasformazione. Ma costruendo la differenza di due posizioni i contributi dovuti ai due *SC* si annullano reciprocamente, come mostra il disegno. Dobbiamo infatti prima aggiungere e poi dedurre la distanza che separa le origini dei due *SC*. La distanza fra due punti è dunque *invariante*, vale a dire indipendente dalla scelta dell'*SC*.



Un ulteriore esempio di una quantità indipendente dallo *SC* è la variazione di velocità o accelerazione, concetto che conosciamo dalla meccanica. Si abbia nuovamente un punto materiale in moto uniforme e rettilineo, osservato da due diversi *SC*. La sua accelerazione è, per l'osservatore in ciascuno degli *SC* una differenza di due velocità; e il contributo dovuto al moto relativo e uniforme dei due *SC* si annulla allorché si calcola la differenza. Pertanto l'accelerazione è un invariante, a condizione, beninteso, che il moto relativo dei nostri due *SC* sia uniforme. In caso contrario l'accelerazione del punto risulterebbe differente per i due *SC*, ossia per le due aste che li rappresentano, e ciò causa l'accelerazione del loro moto relativo.

E ora un ultimo esempio. Siano due punti materiali fra i quali agiscono forze dipendenti unicamente dalla distanza. Nel caso del

movimento rettilineo, la distanza e pertanto anche la forza, sono invarianti. In conseguenza la legge di Newton, che stabilisce il nesso fra la forza e l'accelerazione, sarà valevole in entrambi gli SC. Per veniamo così nuovamente a una conclusione confermata dall'esperienza quotidiana: se le leggi della meccanica sono valide in un SC, lo sono anche in tutti gli SC, in moto uniforme, relativamente al primo. L'esempio del quale ci siamo valse è quanto mai semplice: si tratta del movimento rettilineo per il quale l'SC può venire rappresentato semplicemente da un'asta rigida. Ma le nostre conclusioni hanno portata generale e possono riassumersi come segue:

1) Non si conoscono regole per trovare un sistema inerziale. Ma dato che ne esista uno, se ne possono trovare altri in numero infinito, poiché tutti gli SC in moto uniforme l'uno relativamente all'altro sono dei sistemi inerziali, sempre che uno di essi lo sia.

2) Il tempo corrispondente a un evento è lo stesso in tutti gli SC. Ma le coordinate e le velocità sono diverse e differiscono in conformità alle leggi di trasformazione.

3) Ancorché coordinate e velocità differiscano quando si passa da un SC a un altro, forza e accelerazione e pertanto le leggi della meccanica sono invarianti rispetto alle leggi di trasformazione.

Le leggi di trasformazione, testé formulate per le coordinate e per la velocità, le chiameremo leggi di trasformazione della meccanica classica o, più brevemente, la *trasformazione classica*.



## Etere e moto

Il principio galileiano di relatività è valevole per tutti i fenomeni meccanici. Le stesse leggi meccaniche si applicano a tutti i sistemi inerziali in moto l'uno relativamente all'altro. Tale principio è forse valido anche per i fenomeni non meccanici e in particolare per i fenomeni nei cui confronti il concetto di campo riveste particolare importanza? Tutti i problemi che si concentrano intorno a tale quesito ci conducono al punto di partenza della teoria della relatività.

Rammentiamo che la velocità della luce *nel vuoto*, altrimenti detto, nell'etere, è di 300 000 chilometri circa al secondo, e che la luce è un'onda elettromagnetica propagantesi attraverso l'etere. Rammentiamo anche che il campo elettromagnetico trasporta energia la quale, una volta emessa, conduce vita indipendente dalla sorgente. E benché le numerose difficoltà inerenti alla sua struttura meccanica ci sian ben note, continueremo provvisoriamente a credere che l'etere sia un mezzo in cui si propagano le onde elettromagnetiche e, pertanto, anche le onde luminose.

Immaginiamo di essere seduti in una stanza così ben isolata dal mondo esterno che l'aria non possa né penetrarvi, né uscirne. Se parliamo senza muoverci, produciamo, dal punto di vista fisico, delle onde sonore che si propagano dalla sorgente ferma con la velocità del suono nell'aria. Se l'aria o un altro mezzo materiale non fosse interposto fra gli interlocutori, questi non potrebbero udire suono alcuno. È poi sperimentalmente assodato che la velocità del suono nell'aria è la stessa in tutte le direzioni, sempre che non vi sia vento e che nell'*SC* prescelto l'aria sia immobile.

Supponiamo ora che la nostra stanza si muova di moto uniforme nello spazio. Se le pareti della stanza (o del treno se lo preferite)

sono di vetro, un osservatore situato all'esterno sarà in grado di vedere tutto ciò che avviene nell'interno e di conoscere i risultati delle misure effettuate sulla velocità del suono. In base a tali misure il nostro osservatore esterno sarà anche in grado di calcolare la velocità del suono per rapporto al proprio SC vincolato al mezzo ambiente rispetto al quale la stanza si muove. Qui si presenta il vecchio problema, precedentemente discusso, della determinazione della velocità in un SC, allorché essa è già conosciuta in un altro.

Un osservatore nell'interno della stanza affermerà: la velocità del suono è, per me, la stessa in tutte le direzioni.

L'osservatore esterno affermerà invece: secondo le osservazioni fatte nel mio SC, la velocità del suono che si propaga nella stanza in moto non è la stessa in tutte le direzioni. Essa è maggiore della velocità normale nella direzione del moto della stanza e minore in direzione opposta.

Queste conclusioni sono tratte dalla trasformazione classica e possono venir confermate con l'esperimento. La stanza trascina con sé il mezzo materiale, ovvero l'aria attraverso la quale i suoni si propagano, motivo per cui la velocità risulta diversa per i due osservatori.

Dalla teoria che considera il suono come un'onda che si propaga in un mezzo materiale possiamo trarre qualche altra conclusione. Il modo migliore, benché non il più semplice, di non udire la parola di qualcuno è di allontanarci con velocità superiore a quella del suono, relativamente all'aria che circonda il parlatore. In tal caso le onde sonore che questi produce non potranno più colpire le nostre orecchie. D'altro canto, se ci accadesse di non udire una parola importante, che un oratore non avesse mai più occasione di pronunciare, dovremmo spostarci con una velocità superiore a quella del suono per raggiungere l'onda sonora in moto e per udire così quella tal parola. In questi esempi non v'è nulla di straordinario all'infuori della circostanza che in entrambi i casi dovremmo spostarci con una velocità di almeno 350 metri al secondo, ed è lecito pensare che il progresso tecnico finirà per consentirci di viaggiare a velocità di tale ordine. Un proiettile d'artiglieria si muove con velocità assai superiore a quella del suono e uno di noi che fosse portato dal proiettile non udrebbe il rumore dello sparo.

Notiamo che tutti questi esempi hanno carattere puramente meccanico, e torniamo all'importante quesito che ci siamo posti all'ini-

zio di questo capitolo, per formularlo nei termini seguenti: Quanto è stato detto per l'onda sonora è forse valevole anche per l'onda luminosa? Il principio galileiano di relatività e la trasformazione classica si applicano forse soltanto ai fenomeni meccanici, oppure anche ai fenomeni ottici ed elettrici? Sarebbe arrischiato rispondere con un «sì» o un «no» prima d'investigare più profondamente il significato del nostro quesito.

Nel caso dell'onda sonora, entro la stanza in moto uniforme relativamente all'osservatore esterno, le proposizioni essenziali per giungere alla nostra conclusione sono:

1) La stanza in moto trascina l'aria nella quale si produce l'onda sonora.

2) Le velocità osservate nei due  $SC$ , in moto uniforme l'uno relativamente all'altro, sono connesse dalla trasformazione classica.

Il problema corrispondente per la luce va formulato alquanto diversamente.

Gli osservatori nell'interno della stanza, invece di parlare, lanciano in tutte le direzioni segnali luminosi, le cui sorgenti devono, beninteso, suppersi inamovibili. Sapendo già che le onde luminose si propagano attraverso l'etere come le onde sonore si propagano attraverso l'aria, vien fatto di chiederci: l'etere viene forse trascinato dalla stanza, come avveniva con l'aria? Dato che non possediamo nessuna immagine meccanica dell'etere è assai difficile rispondere. Se la stanza è ermeticamente chiusa, l'aria contenutavi è costretta a spostarsi con essa. Ma immaginarsi che lo stesso avvenga con l'etere non ha evidentemente alcun senso, poiché non soltanto tutta la materia è immersa nell'etere, ma esso penetra ovunque. Per l'etere non vi sono porte chiuse, e la stanza in moto non significa altro che un  $SC$  in moto, cui la sorgente luminosa è rigidamente collegata. Nulla ci vieta tuttavia di considerare l'ipotesi secondo cui la stanza in moto assieme alla sua sorgente luminosa trascinerebbe con sé l'etere, così come nell'esempio precedente la stanza trascinava l'aria, che vi era rinchiusa, assieme alla sorgente sonora. Si può però anche pensare all'ipotesi opposta e cioè che la stanza si muova attraverso l'etere, come una nave filante con mare calmo, senza trascinare parte alcuna del mezzo ambiente, ma soltanto fendendolo. Nella prima ipotesi secondo cui la stanza in moto assieme alla sorgente luminosa trascinerebbe l'etere c'è analogia

con l'onda sonora e se ne possono trarre conseguenze del tutto simili. Nella seconda ipotesi, la stanza in moto assieme alla sua sorgente luminosa non trascinerebbe l'etere. Qui non c'è più nessuna analogia con l'onda sonora e le conseguenze dedotte nei confronti di questa non sono valide per l'onda luminosa. Oltre le predette due possibilità opposte, ne possiamo immaginare una terza più complicata e cioè che l'etere venga trascinato soltanto parzialmente dalla stanza in moto assieme alla sua sorgente luminosa. Sarebbe tuttavia fuori posto discutere la supposizione più complicata, prima di sapere in favore di quale dei due casi limite si pronuncia l'esperienza.

Cominciamo dalla nostra prima ipotesi e ammettiamo provvisoriamente che l'etere venga trascinato dalla stanza in moto a cui la sorgente luminosa è rigidamente collegata. In tal caso, se abbiamo fiducia nel principio di trasformazione, valido per le onde sonore, possiamo applicarne le conclusioni anche alle onde luminose. Non c'è ragione di nutrire dubbi sulla legge della trasformazione meccanica, la quale afferma soltanto che le velocità devono sommarsi o sottrarsi, secondo i casi. Ammesso dunque provvisoriamente che l'etere venga trascinato dalla stanza in moto con la sua sorgente luminosa, dovremmo anche ammettere che la trasformazione classica sia valevole.

Un segnale luminoso lanciato dalla sorgente rigidamente collegata alla nostra stanza in moto si propaga, com'è noto, con la velocità di 300 000 chilometri circa al secondo. L'osservatore esterno noterà il movimento della stanza e perciò quello della sorgente luminosa; e poiché l'etere viene trascinato, egli dovrà giungere alla conclusione seguente: la velocità della luce nel mio *SC* esterno varia a seconda della direzione; essa è maggiore della velocità normale nella direzione del moto della stanza e minore nella direzione opposta. Concludendo: se l'etere viene trascinato dalla stanza in moto assieme alla sorgente luminosa e se le leggi della meccanica sono applicabili, allora la velocità della luce deve dipendere dalla velocità della sorgente luminosa. La luce che ci perviene da una sorgente luminosa in moto deve avere una velocità maggiore se la sorgente si muove verso di noi, e minore se la sorgente si allontana da noi.

Qualora potessimo spostarci con velocità maggiore di quella della luce, saremmo in grado di sorpassare un segnale luminoso. Potremmo vedere gli avvenimenti del passato raggiungendo i raggi luminosi emes-

si anteriormente; raggiungeremmo tali raggi in ordine inverso a quello secondo cui vennero emessi e il decorso degli eventi sulla nostra Terra si presenterebbe come una pellicola cinematografica proiettata a ritroso, cominciando dalla fine. Queste conclusioni scendono tutte dai presupposti che l'*SC* in moto trascina l'etere e che le leggi di trasformazione della meccanica sono valide anche per la luce. Se così fosse, allora l'analogia fra suono e luce sarebbe perfetta. Ma non esiste nessun indizio che provi la fondatezza di queste conclusioni. Al contrario, esse sono contraddette da tutte le osservazioni fatte con l'intento di comprovarle. Non v'è ombra di dubbio sulla portata del verdetto sperimentale, benché emesso in base a esperienze indirette, causa le grandi difficoltà tecniche inerenti all'enorme velocità della luce: *la velocità della luce è sempre la stessa in tutti gli SC, sia che la sorgente emittente si muova o meno, e comunque essa si muova.*

Non è il caso di fare qui il resoconto dettagliato delle numerose esperienze dalle quali è stata tratta questa importante conclusione. Possiamo tuttavia ricorrere ad alcuni argomenti elementari, i quali se anche non provano che la velocità della luce è indipendente dal moto della sorgente, rendono comunque il fatto convincente e intelligibile.

Nel nostro sistema planetario, la Terra e gli altri pianeti si muovono intorno al Sole. Non si conoscono altri sistemi planetari simili al nostro. Esistono tuttavia molti sistemi di stelle doppie, costituiti da due stelle le quali si muovono intorno al centro di gravità del sistema. L'osservazione del movimento di queste stelle doppie fornisce un'ulteriore splendida prova della validità della legge di gravitazione newtoniana. Supponiamo ora che la velocità della luce dipenda dalla velocità del corpo emittente. In tal caso i raggi luminosi emessi dalla coppia stellare si propagherebbero più rapidamente o più lentamente a seconda della velocità delle stelle nell'istante dell'emissione. Ne seguirebbero perturbazioni nell'apparenza del moto che renderebbero impossibile la conferma della validità, per le stelle doppie lontane, delle leggi di gravitazione governanti il nostro sistema planetario.

Prendiamo a considerare un'altra esperienza basata su una idea semplicissima. Immaginiamo una ruota che giri molto rapidamente. Secondo la nostra supposizione l'etere viene trascinato dal moto e vi partecipa. Un'onda luminosa transitante vicino alla ruota dovrebb-

be dunque possedere una velocità differente, secondo che la ruota fosse in moto o a riposo. La velocità della luce nell'etere a riposo dovrebbe essere differente da quella nell'etere trascinato rapidamente dal movimento della ruota, precisamente come la velocità di un'onda sonora differisce secondo che l'aria sia calma o che tiri vento. Ma nessuna differenza del genere è stata mai constatata. Qualunque sia il lato di approccio alla questione e qualunque sia l'esperienza cruciale ideata, il verdetto è sempre contro la supposizione che l'etere venga trascinato dal moto. Pertanto il risultato delle nostre considerazioni, confermato da numerosi argomenti d'indole tecnica, è:

La velocità della luce non dipende dal moto della sorgente emittente. Non si deve supporre che il corpo in moto trascini l'etere che lo circonda.

Dobbiamo dunque rinunciare all'analogia fra onde sonore e onde luminose e contemplare la seconda possibilità, quella cioè che tutta la materia si muova attraverso l'etere, senza che questo prenda parte al moto. Ciò significa ammettere l'esistenza di un oceano d'etere, nel quale tutti gli SC si trovano immersi, siano essi a riposo o in moto relativamente ad esso. Lasciamo, per ora, in sospenso la questione se l'esperienza confermi o refuti questa teoria e familiarizziamoci piuttosto con il significato della nostra nuova supposizione e con le conseguenze che se ne possono trarre.

Ammettiamo che esista un SC in riposo relativamente all'etere. In meccanica, nessuno dei numerosi SC in moto uniforme l'uno relativamente all'altro gode di un privilegio particolare. Tali SC sono tutti ugualmente «buoni» o «cattivi». Se abbiamo due SC in moto uniforme l'uno relativamente all'altro, non ha senso in meccanica domandare quale di essi sia a riposo e quale in moto. Ciò che è osservabile è soltanto il moto relativo. Non si può parlare di moto uniforme assoluto, in forza del principio galileiano di relatività. Che cosa s'intende dire affermando che esiste un moto *assoluto* e non soltanto un moto uniforme *relativo*? Semplicemente questo: che esiste un SC nel quale talune delle leggi della natura sono diverse dalle leggi valevoli in tutti gli altri SC. E altresì che ogni osservatore è in grado di constatare se il suo SC è in riposo oppure in moto, mediante il confronto delle leggi valevoli in esso, con le leggi valevoli in quell'unico SC avente il privilegio assoluto di servire come

termine di paragone o modello, che dir si voglia. Avremmo allora una situazione ben diversa da quella offertaci dalla meccanica classica, secondo cui il moto uniforme assoluto è privo di senso, in virtù della legge d'inerzia di Galileo.

Quali conclusioni possono trarsi nel dominio dei fenomeni del campo se si ammette il moto attraverso l'etere? Ciò equivarrebbe precisamente a dire che esiste un SC diverso da tutti gli altri, e in riposo relativamente all'oceano d'etere. È senz'altro chiaro che in questo SC alcune delle leggi della natura dovrebbero essere differenti, altrimenti l'espressione «moto attraverso l'etere» non significherebbe più nulla. Ma se il principio galileiano di relatività deve essere valevole, allora il moto attraverso l'etere è privo di senso. Come si vede è impossibile conciliare queste due idee. È però evidente che se esistesse un SC particolare, vincolato all'etere, allora il «moto assoluto» e la «quiete assoluta» avrebbero un significato concreto.

In verità, non ci è dato scegliere. Abbiamo cercato di salvare il principio galileiano di relatività supponendo che i sistemi in moto trascinino con sé l'etere, ma ciò ha condotto a una contraddizione con l'esperienza. La sola via d'uscita sembra dunque essere quella di rinunciare al principio galileiano di relatività e di mettere alla prova la supposizione che tutti i corpi si muovono attraverso un oceano d'etere immobile.

Bisogna allora esaminare alcune conclusioni in contrasto con il principio galileiano di relatività, ma compatibili con la concezione del moto attraverso l'etere e poi sottoporle alla prova dell'esperienza. Diciamo subito che è facile escogitare esperimenti adatti ma assai difficile eseguirli. Essendo tuttavia il nostro compito quello di occuparci unicamente delle idee, non abbiamo motivo di dar peso alle difficoltà tecniche.

Torniamo alla nostra stanza in moto e ai due osservatori uno nell'interno e l'altro all'esterno. L'osservatore esterno rappresenterà l'SC modello, identificantesi con l'oceano d'etere. È questo l'SC privilegiato nel quale la velocità della luce possiede sempre lo stesso valore normale; nell'oceano d'etere immobile, la luce di tutte le sorgenti luminose, siano esse in moto o a riposo, si propaga sempre con la stessa velocità. La stanza e il suo osservatore interno si muovono dunque attraverso l'etere. Immaginiamo che al centro della stanza una luce venga alternativamente accesa e spenta e inoltre che le

pareti della stanza stessa siano trasparenti, di modo che gli osservatori, tanto all'interno quanto all'esterno, possano misurare la velocità della luce. Se domandassimo agli osservatori quali risultati essi contano di ottenere, le loro risposte sarebbero pressappoco le seguenti:

*Osservatore esterno:* il mio SC s'identifica con l'oceano d'etere. La velocità della luce del mio SC è invariabilmente quella normale. Non ho motivo di preoccuparmi se la sorgente luminosa o altri corpi siano o meno in moto, poiché essi non trascinano mai l'etere del mio oceano. Il mio SC si distingue da tutti gli altri e la velocità della luce deve possedervi sempre il valore normale, indipendentemente dalla direzione del raggio luminoso o dal moto della sua sorgente.

*Osservatore interno:* La mia stanza è in moto attraverso l'oceano d'etere. Una delle pareti si allontana dalla luce e l'altra se ne avvicina. Se la mia stanza si muovesse, relativamente all'oceano d'etere, con la velocità della luce, allora l'onda luminosa lanciata dal centro non potrebbe mai raggiungere la parete che le fugge davanti, con la medesima velocità della luce. Se invece la stanza si muovesse con velocità inferiore a quella della luce, allora l'onda luminosa lanciata dal centro raggiungerebbe una delle pareti prima dell'altra. E cioè la parete avanzante incontro all'onda luminosa verrebbe raggiunta dalla luce prima della parete che se ne allontana. Pertanto, benché la sorgente luminosa sia rigidamente collegata al mio SC, la velocità della luce non potrebbe essere la stessa in tutte le direzioni. Relativamente all'oceano d'etere, la velocità della luce sarebbe minore nella direzione del moto, ovvero verso la parete che fugge con l'onda; sarebbe invece maggiore nella direzione opposta, verso la parete che viene incontro all'onda.

In conclusione, la velocità della luce sarebbe la stessa in tutte le direzioni soltanto nell'SC privilegiato, che si identifica con l'oceano d'etere. Per altri SC, in moto relativamente all'oceano di etere, la velocità dipenderebbe dalla direzione nella quale si effettua la misura.

L'esperimento appena considerato è cruciale, poiché mette alla prova la teoria del moto attraverso l'oceano d'etere. La natura ci offre infatti un sistema che si muove con velocità notevole e con il quale possiamo realizzare l'esperimento: la Terra nel suo moto annuale di rivoluzione intorno al Sole. Se la conclusione ora formula-



ta fosse fondata, la velocità della luce nel senso del moto di traslazione della Terra dovrebbe essere differente da quella in senso opposto. Si può calcolare la differenza e poi montare un appropriato esperimento conclusivo. Data l'esiguità delle differenze di tempo, risultanti dalla teoria, si devono escogitare dispositivi sperimentali estremamente ingegnosi. Ciò è stato fatto con il celebre esperimento di Michelson-Morley. Il risultato fu un «verdetto di morte» per la teoria di un oceano d'etere immobile attraverso il quale tutta la materia si muoverebbe. Non si è trovato il minimo indizio che la velocità della luce dipenda dalla direzione. Se la teoria dell'oceano d'etere fosse vera, non soltanto la velocità della luce ma anche altri fenomeni del campo manifesterebbero una dipendenza dalla direzione dell'*SC* in moto. Tutti gli esperimenti hanno dato risultato negativo come quello di Michelson-Morley; nessuno di essi ha rivelato la minima dipendenza dalla direzione del moto terrestre.

Ci troviamo pertanto di fronte a una situazione assai grave. Abbiamo discusso due ipotesi. La prima, che i corpi in moto trascinassero l'etere. Ma il fatto che la velocità della luce non dipende dal moto della sorgente contraddice questa supposizione. La seconda ipotesi era che esistesse un *SC* privilegiato e che i corpi in moto non trascinassero l'etere, bensì attraversassero un oceano d'etere eternamente immobile. Ma se così fosse, il principio galileiano di relatività non sarebbe valido, e la velocità della luce non dovrebbe essere la stessa in ogni *SC*. Anche qui ci troviamo dunque in contraddizione con l'esperienza.

Sono state escogitate anche teorie più artificiose, basate sulla supposizione che la verità possa trovarsi fra questi due casi limite e cioè che l'etere sia trascinato soltanto parzialmente dai corpi in moto. Ma nessuna di tali teorie ha potuto reggere.

Tutti i tentativi volti a spiegare i fenomeni elettromagnetici negli *SC* in moto, sia ricorrendo al moto dell'etere, sia ricorrendo al moto attraverso l'etere, sia postulando questi due moti insieme, si sono palesati inutili.

Si creò così una delle più drammatiche situazioni che la storia della scienza ricordi. Tutte le supposizioni concernenti l'etere non conducevano a nulla. Il verdetto degli esperimenti era ed è sempre stato negativo. Uno sguardo retrospettivo sullo sviluppo della fisica ci mostra che l'etere, non appena nato, divenne *l'enfant terrible*

della famiglia delle sostanze fisiche. In primo luogo la costruzione di una immagine meccanica semplice dell'etere si rivelò impossibile, e venne perciò scartata, il che contribuì non poco alla rovina della concezione meccanicistica. In secondo luogo si dovette abbandonare la speranza che mercé l'esistenza di un oceano di etere si disponesse di un SC privilegiato, mediante il quale fosse possibile accertare il moto assoluto e non soltanto il moto relativo. Sarebbe stato questo l'unico motivo, all'infuori della trasmissione delle onde, con il quale l'etere avrebbe potuto manifestare e giustificare la propria esistenza. Tutti i tentativi di fare dell'etere una realtà sono falliti. Esso non ha rivelato né la propria struttura meccanica, né il moto assoluto. Nulla è rimasto di tutte le proprietà dell'etere, eccetto quella per la quale esso venne inventato, ovvero la facoltà di trasmettere le onde elettromagnetiche. E poiché i nostri tentativi per scoprirne le proprietà non hanno fatto che creare difficoltà e contraddizioni, sembra giunto il momento di dimenticare l'etere e di non pronunciarne più il nome. Diremo dunque che il nostro spazio possiede la facoltà fisica di trasmettere talune onde, e cesseremo di usare una parola ormai inutile. Ma l'omissione di un vocabolo dal nostro dizionario non è un rimedio. Il nostro imbarazzo è infatti troppo serio per venir eliminato in tal modo.

Ricapitoliamo i fatti, sufficientemente corroborati dalla sperimentazione, senza più curarci del problema dell' «e... re»:

1) La velocità della luce nello spazio vuoto è sempre la stessa, indipendentemente dal moto della sorgente o del ricevitore della luce.

2) In due SC animati di moto uniforme, l'uno relativamente all'altro, tutte le leggi della natura sono rigorosamente identiche e non c'è mezzo di distinguere il moto uniforme assoluto.

Esistono molti esperimenti che confermano entrambi questi enunciati, ma nessuno contraddice l'uno o l'altro di essi. Il primo di questi due enunciati in conflitto fra di loro asserisce la costanza della velocità della luce; il secondo estende a tutti gli eventi della natura il principio galileiano di relatività, formulato per i fenomeni meccanici.

In meccanica abbiamo visto che se la velocità di un punto materiale ha un dato valore relativamente a un dato SC, essa è differente in un altro SC, animato di moto uniforme rispetto al primo. Ciò

segue dai semplici principi della trasformazione meccanica, suggeriti direttamente dalla nostra intuizione (il viaggiatore in moto relativamente alla nave e alla sponda). È evidente che non può esservi errore; ciò nonostante questa legge di trasformazione è in conflitto con la costanza della velocità della luce.

Aggiungiamo ora un terzo enunciato ai due precedenti, e cioè:

3) Posizione e velocità vengono ricondotte da un sistema inerziale all'altro, in conformità alla trasformazione classica.

Il conflitto diventa così più evidente che mai. Non è infatti possibile combinare i nostri tre enunciati 1, 2 e 3. La trasformazione classica 3 sembra a prima vista troppo ovvia e semplice perché si possa pensare di modificarla. D'altro canto nessuno dei tentativi da noi fatti per modificare utilmente 1 e 2 è riuscito; ci siamo sempre scontrati con un disaccordo con l'esperienza. Tutte le teorie concernenti il moto dell' «e... re» esigono bensì le modificazioni di 1 e 2, ma tutti i tentativi a tal fine non sono serviti a nulla.

Dobbiamo, più che mai, riconoscere la gravità del nostro imbarazzo. Bisogna pertanto ricorrere a un nuovo criterio. Esso consiste nell'*accettare gli enunciati fondamentali 1 e 2*, ancorché in conflitto fra di loro, e, per strano che ciò possa sembrare, *nel rinunciare a 3*. Questo nuovo criterio trae origine da un'analisi dei concetti basilari più elementari. Mostriamo come tale analisi ci costringa a modificare le nostre antiche vedute e come essa elimini tutte le difficoltà riscontrate.

## Tempo, distanza, relatività

Le nostre nuove supposizioni sono:

- 1) *La velocità della luce*, nel vuoto, è la stessa in tutti gli SC, in moto uniforme gli uni relativamente agli altri.
- 2) *Tutte le leggi della natura sono le stesse in tutti gli SC in moto uniforme*, gli uni relativamente agli altri.

La *teoria della relatività* inizia con queste due supposizioni. Esse sono in contraddizione con la trasformazione classica, per cui d'ora in poi rinunceremo a servirci di quest'ultima.

L'essenziale è qui, come sempre nella scienza, di sbarazzarci da pregiudizi profondamente radicati e spesso invocati senza previa disamina. Poiché le tentate modificazioni di 1 e 2 conducono a contraddizioni con l'esperienza, dobbiamo avere il coraggio di riconoscerne decisamente la validità e di attaccare quindi il solo punto palesemente debole, vale a dire le modalità della trasformazione per il passaggio da un SC all'altro. Dobbiamo perciò proporci di trarre anzitutto delle conclusioni dalle nostre supposizioni 1 e 2, per poi esaminare dove e come esse contrastino con la trasformazione classica e quindi scoprire il significato fisico dei risultati raggiunti.

Ci serviremo nuovamente della stanza in moto e delle osservazioni effettuate nell'interno e all'esterno di essa. Un segnale luminoso viene lanciato dal centro della stanza. Domandiamo nuovamente ai due osservatori ciò che essi si attendono di accertare, basandosi unicamente sui due suddetti principi e prescindendo da ogni considerazione in merito al mezzo nel quale la luce si propaga. Ecco le loro risposte:

*Osservatore interno:* Il segnale luminoso che si propaga dal centro della stanza raggiungerà *simultaneamente* le pareti, poiché que-

ste sono ugualmente distanti dalla sorgente luminosa e poiché la velocità della luce è la stessa in tutte le direzioni.

*Osservatore esterno:* Nel mio sistema la velocità della luce è esattamente la stessa come nel sistema dell'osservatore in moto con la stanza. Per me non ha importanza sapere se la sorgente luminosa si muove o no nel mio SC, poiché il suo moto non influisce per nulla sulla velocità della luce. Ciò che vedo è un segnale luminoso che si propaga con velocità normale e sempre uguale in tutte le direzioni. Una delle pareti s'allontana davanti al raggio luminoso, mentre la parete opposta gli viene incontro e perciò la prima riceverà il segnale luminoso un po' dopo la seconda. La differenza sarà lievissima qualora la velocità della stanza sia piccola a paragone di quella della luce. Tuttavia il segnale luminoso non raggiungerà del tutto simultaneamente le due pareti in questione, le quali sono perpendicolari alla direzione del moto.

Paragonando le previsioni dei due osservatori giungiamo a un risultato sorprendente, e in aperto conflitto con i concetti apparentemente ben fondati della fisica classica. Due eventi, per esempio i due raggi luminosi che colpiscono le due pareti, sarebbero simultanei per l'osservatore nell'interno, ma non lo sarebbero per l'osservatore all'esterno. Nella fisica classica avevamo uno stesso orologio, cioè uno stesso flusso del tempo per tutti gli osservatori, in tutti gli SC. Il tempo e perciò espressioni come «simultaneamente», «prima», «dopo» avevano un significato assoluto e indipendente da qualsiasi SC. Due eventi producentisi nello stesso istante in un dato SC erano necessariamente simultanei in tutti gli altri SC.

Le supposizioni 1 e 2, vale a dire la teoria della relatività, ci obbligano a rinunciare a questo punto di vista. Abbiamo appena descritto due eventi che si producono simultaneamente in un SC, ma in istanti diversi in un altro SC. È nostro compito di comprendere tale possibilità, di comprendere cioè la proposizione: *Due eventi che sono simultanei in un SC, possono non esserlo in un altro SC.*

Che cosa intendiamo per «due eventi simultanei in un SC»? Sembrerebbe che intuitivamente ognuno debba conoscere il significato di questa proposizione. Ma ricordando quanto sia pericoloso presumere troppo dall'intuizione, procediamo cautamente e proviamo a

dare definizioni rigorose. Rispondiamo anzitutto a una domanda assai semplice:

Che cosa è un orologio?

La spontanea sensazione soggettiva sul flusso del tempo ci pone in grado di ordinare le nostre impressioni, di giudicare cioè che un evento si verifica prima e un altro dopo. Ma per giudicare se l'intervallo di tempo fra due eventi è, ad esempio, di dieci secondi, occorre un orologio. Mediante l'impiego dell'orologio il concetto di tempo diventa oggettivo. Un evento fisico qualsiasi può servire da orologio, purché esso possa venir ripetuto con esattezza, tante volte quante vogliamo. Scegliendo come unità l'intervallo di tempo fra principio e fine di un evento simile, si possono misurare, mediante la ripetizione dell'evento stesso, intervalli di tempo arbitrari. Tutti gli orologi, dalla semplice clessidra agli strumenti più raffinati, si basano su questo principio. Nel caso della clessidra si prende come unità il tempo che la sabbia impiega per passare dal ricettacolo superiore all'inferiore. Lo stesso processo fisico può venir ripetuto capovolgendo l'apparecchio.

Due orologi perfetti, situati in due punti distanti indicano esattamente lo stesso tempo. Questa affermazione dovrebbe essere vera indipendentemente dalla scrupolosità con la quale la verifichiamo. Ma che cosa significa essa realmente? In qual modo si può accertare che orologi lontani l'uno dall'altro indicano sempre esattamente lo stesso tempo? Uno dei possibili metodi è la televisione. Resti tuttavia inteso che quest'ultima è bensì utile a titolo di esempio, ma non essenziale alla nostra argomentazione. Posso dunque collocarmi accanto a uno degli orologi e osservare l'immagine dell'altro, trasmessa dalla televisione. Potrò così giudicare se sì o no i due orologi indicano simultaneamente la stessa precisa ora. Ma è questa una buona prova? L'immagine televisiva viene trasmessa da onde elettromagnetiche e si sposta perciò con la velocità della luce. Mediante la televisione vedo dunque un'immagine partita un brevissimo intervallo di tempo prima, mentre sull'orologio reale leggo l'ora attuale. Questa difficoltà può venire facilmente eliminata. Basterà che io mi collochi in un punto ugualmente distante dai due orologi e che osservi le rispettive immagini televisive da questo punto centrale. In tal caso, se i segnali sono lanciati simultaneamente, essi mi perverranno nello stesso istante. Se due «buoni» orologi, osservati

nel punto mediano della distanza che li separa, indicano sempre la stessa ora, essi sono *sincronizzati*, vale a dire qualificati per indicare il tempo degli eventi in due punti distanti.

In meccanica ci si serve di un solo orologio. Ma ciò non è molto soddisfacente poiché costringe a eseguire tutte le misurazioni in vicinanza di questo unico orologio. Osservando un orologio da lontano, mediante la televisione ad esempio, dobbiamo sempre ricordare che ciò che si vede all'istante è realmente avvenuto anteriormente, così come guardando il calar del Sole vediamo l'evento otto minuti dopo che si è prodotto. Notando l'ora si dovrebbero sempre introdurre correzioni adeguate alla distanza dell'orologio.

È perciò incomodo servirsi di un solo orologio. Ma sapendo ormai come giudicare se due o più orologi indicano simultaneamente lo stesso tempo e se inoltre camminano con lo stesso ritmo, possiamo benissimo immaginarci di disporre in un dato *SC* di tanti orologi quanti vogliamo. Ognuno di essi ci servirà per determinare il tempo degli eventi che si producono nella sua vicinanza immediata. Se tutti gli orologi si trovano a riposo relativamente all'*SC* saranno tutti dei «buoni» orologi, e se sono inoltre «sincronizzati» tutti essi indicheranno lo stesso tempo simultaneamente.

Tutto ciò non presenta nulla di notevole, né di strano. Servendoci di più orologi sincronizzati, invece d'uno solo, possiamo giudicare facilmente se, in un dato *SC*, due eventi distanti sono simultanei o no. Essi lo sono se, nell'istante in cui gli eventi si producono, gli orologi sincronizzati situati nella loro vicinanza immediata indicano lo stesso tempo. Dire che l'uno degli eventi distanti ha luogo prima dell'altro ha in tal caso significato preciso. Tutto ciò può essere accertato mediante orologi sincronizzati e a riposo nel nostro *SC*.

Finora tutto si accorda con la fisica classica, e nulla contraddice la trasformazione classica.

Per poter definire la simultaneità degli eventi gli orologi vanno sincronizzati mediante segnali. È essenziale ai nostri fini che detti segnali si spostino con la velocità della luce, velocità che riveste importanza fondamentale nella teoria della relatività.

Volendo ora discutere l'importante problema di due *SC* in moto uniforme l'uno relativamente all'altro, considereremo due aste rigide, munite di orologi. L'osservatore in ciascuno di questi due *SC*

in moto l'uno rispetto all'altro dispone di una propria serie di orologi rigidamente collegati alla propria asta.

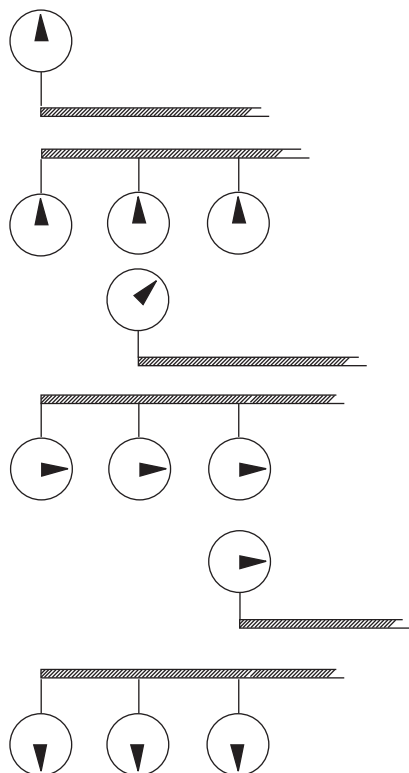
Allorché abbiamo trattato dei procedimenti di misurazione in uso nella meccanica classica, abbiamo visto che ci si serviva di un unico orologio per tutti gli *SC*. Ora, invece, abbiamo molti orologi per ogni *SC*. Ciò non guasta. Non possono sollevarsi obiezioni contro l'impiego di più d'un orologio, sempre che tutti gli orologi siano «buoni» e inoltre «sincronizzati».

Abbordiamo ora il punto essenziale, nel quale si manifesta dov'è che la trasformazione classica si trova in contrasto con la teoria della relatività. Che cosa accade quando due serie di orologi si muovono uniformemente, l'una relativamente all'altra? Il fisico classico risponderebbe: non accade nulla; gli orologi camminano sempre con lo stesso ritmo, cosicché volendo stabilire il tempo possiamo servirci indifferentemente di orologi in moto o a riposo. Secondo la fisica classica due eventi simultanei in uno degli *SC* sono simultanei anche in ogni altro *SC*.

Ma questa risposta non è la sola possibile. Possiamo anche immaginare che un orologio in moto cammini con ritmo diverso da quello di un orologio a riposo. Discuteremo questa possibilità senza decidere, per ora, se gli orologi cambino realmente di ritmo allorché si trovano in moto. Che cosa s'intende dire con l'affermazione che un orologio in moto modifica il proprio ritmo? Supponiamo, per semplificare, di avere un solo orologio nell'*SC* superiore e più orologi nell'*SC* inferiore. Tutti gli orologi hanno identico meccanismo e quelli dell'*SC* inferiore sono sincronizzati, vale a dire segnano lo stesso tempo simultaneamente. Nella figura a pagina seguente abbiamo disegnato tre posizioni successive dei due *SC*, in moto uniforme l'uno rispetto all'altro.

Nel primo disegno, le posizioni delle lancette tanto dell'orologio superiore quanto degli orologi inferiori sono, per convenzione, tutte le stesse, essendo state predisposte precisamente così. Tutti gli orologi indicano il medesimo tempo. Nel secondo disegno vediamo le posizioni relative dei due *SC* qualche istante dopo. Tutti gli orologi nell'*SC* inferiore indicano lo stesso tempo, ma l'orologio nell'*SC* superiore non cammina più con lo stesso ritmo. Questo si è modificato e il tempo non è più il medesimo, perché l'orologio è in moto, relativamente all'*SC* inferiore. Nel terzo disegno vediamo che la differenza di posizione delle lancette è aumentata con il tempo.





Un osservatore a riposo nell'*SC* inferiore troverebbe dunque che un orologio in moto muta di ritmo. Il risultato sarebbe certamente identico se un orologio si muovesse relativamente a un osservatore a riposo nell'*SC* superiore; in tal caso dovrebbero aversi più orologi nell'*SC* superiore e uno solo nell'*SC* inferiore. Rammentiamo che le leggi della natura devono essere le stesse nei due *SC* in moto l'uno relativamente all'altro.

Nella meccanica classica si supposeva tacitamente che un orologio in moto non mutasse di ritmo, e ciò sembrava talmente ovvio che non si riteneva neanche necessario di farne menzione. Ma nulla dovrebbe essere considerato come troppo ovvio; se vogliamo es-

sere realmente scrupolosi dobbiamo sottoporre a una accurata analisi le supposizioni della fisica, tenute finora per certe. Una supposizione non dev'essere considerata irragionevole soltanto perché differisce da quella della meccanica classica. Possiamo benissimo immaginare che un orologio in moto muti di ritmo, sempre che la legge della variazione sia la stessa per tutti gli *SC* inerziali.

Altro esempio. Prendiamo un regolo della lunghezza di un metro; ciò significa che esso ha la lunghezza di un metro finché rimane a riposo in un dato *SC*. Supponiamo ora che esso si muova di moto uniforme scivolando lungo l'asta che rappresenta l'*SC*. La sua lunghezza apparirà forse ancora uguale a un metro? Anzitutto occorre sapere in che modo viene determinata la sua lunghezza. Finché il regolo era a riposo le sue estremità coincidevano con tacche incise sull'*SC* e distanti un metro l'una dall'altra. Ne abbiamo concluso che la lunghezza del regolo a riposo è di un metro. Ma come dobbiamo procedere per misurare il regolo allorché esso si trova in moto? Potremmo operare nel modo seguente: In un dato istante due osservatori prendono simultaneamente delle istantanee l'uno dell'origine, l'altro dell'estremità finale del regolo. Potremmo allora constatare con quali delle tacche incise sull'asta che funge da *SC* coincidono le due estremità del regolo in moto. Avremo così determinato la sua lunghezza, poiché le due immagini sono state prese simultaneamente. Due osservatori sono indispensabili ove occorra notare eventi simultanei in due punti diversi di un dato *SC*. Non c'è ragione di ritenere che il risultato di tali misure debba essere lo stesso come nel caso di un regolo a riposo. Come sappiamo già, la simultaneità è un concetto relativo, dipendente dall'*SC*. Le istantanee essendo state prese simultaneamente, e la simultaneità essendo, come già sappiamo, un concetto relativo dipendente dall'*SC*, è possibilissimo che i risultati delle misure eseguite in tal modo siano differenti in *SC* diversi in moto l'uno relativamente all'altro.

È perfettamente lecito immaginare che così come un orologio muta di ritmo, un regolo muti di lunghezza, sempre che le leggi delle variazioni siano le stesse per tutti gli *SC* inerziali.

Finora non abbiamo fatto che discutere tali possibilità, senza giustificarle.

Rammentiamo: la velocità della luce è la stessa in tutti gli *SC* inerziali. È impossibile conciliare questo fatto con la trasformatio-

ne classica. Il circolo vizioso va spezzato in qualche punto. Non è forse il caso di farlo qui? Non è forse possibile supporre che i mutamenti che si verificano nel ritmo dell'orologio in moto e nella lunghezza del regolo in moto siano tali che la costanza della velocità della luce ne discenda direttamente? In verità possiamo! Qui ci si presenta il primo caso in cui teoria della relatività e fisica classica differiscono radicalmente. Lo vediamo meglio capovolgendo il nostro argomento: Se la velocità della luce è la stessa in tutti gli *SC*, allora i regoli in moto devono mutare lunghezza e gli orologi in moto devono mutare ritmo, secondo leggi di variazione rigorosamente determinate.

In tutto ciò non v'è nulla di misterioso, né di paradossale. Nella fisica classica è stato sempre supposto che gli orologi conservino lo stesso ritmo e i regoli la stessa lunghezza, sia che si trovino in moto, sia che si trovino a riposo. Bisogna rinunciare a questa supposizione se la velocità della luce deve essere la stessa in tutti gli *SC* e se la teoria della relatività deve essere valevole. Non è facile disfarsi di pregiudizi profondamente radicati, ma non c'è altra via di uscita. Dal punto di vista della teoria della relatività, gli antichi concetti appaiono arbitrari. Perché ritenere, com'è stato fatto in passato, che il tempo sia assoluto e scorra in ugual modo per tutti gli osservatori, in tutti gli *SC*? Perché ritenere che la distanza debba essere invariabile? Il tempo è determinato mediante orologi, le coordinate spaziali lo sono mediante regoli e non può escludersi a priori che il risultato della loro determinazione dipenda dal comportamento di questi orologi e di questi regoli, allorché si trovano in moto. Non c'è ragione di credere che gli uni e gli altri si comportino come noi desideriamo. L'osservazione per via indiretta, e cioè per tramite dei fenomeni del campo elettromagnetico, conferma che un orologio e un regolo in moto mutano l'uno di ritmo e l'altro di lunghezza, mentre in base ai fenomeni meccanici non si riteneva che ciò avvenisse. Dobbiamo accettare il concetto del tempo relativo in ogni *SC*, perché questa è la via migliore per uscire dalle difficoltà. L'ulteriore progresso scientifico dovuto alla teoria della relatività mostra che questa nuova concezione non va considerata come un «male necessario», poiché i meriti della teoria sono troppo manifesti.

Finora ci siamo adoperati a mostrare come si sia giunti alle supposizioni fondamentali della teoria della relatività, e come essa ci

abbia costretti a rivedere e a modificare la trasformazione classica, trattando spazio e tempo in modo diverso e nuovo. Il nostro intento è quello di esporre le idee costituenti le basi d'una nuova concezione fisica e filosofica. Tali idee sono semplici; ma sotto la forma che devono rivestire in questo libro, sono insufficienti per condurre a conclusioni non soltanto qualitative, ma anche quantitative. Dobbiamo infatti attenerci al metodo di spiegare soltanto le idee principali e di enunciarne alcune altre senza darne le prove.

Per far risaltare la differenza fra le vedute del fisico antiquato che chiameremo *A* e il quale crede nella trasformazione classica e le vedute del fisico moderno che chiameremo *M* e il quale conosce la teoria della relatività, immagineremo il seguente dialogo:

*A* Credo che in meccanica il principio galileiano di relatività sia valido, perché so che in due *SC* in moto uniforme l'uno relativamente all'altro, le leggi della meccanica sono le stesse: in altri termini credo che tali leggi siano invarianti agli effetti della trasformazione classica.

*M* Ma il principio di relatività deve applicarsi a tutti gli eventi del nostro mondo esterno. Non sono soltanto le leggi della meccanica, bensì tutte le leggi della natura che devono essere le stesse negli *SC* in moto uniforme gli uni relativamente agli altri.

*A* Ma come mai può sostenersi che tutte le leggi della natura sono le stesse negli *SC* in moto uniforme gli uni rispetto agli altri? Agli effetti della trasformazione classica, le equazioni del campo, vale a dire le equazioni di Maxwell, non sono invarianti. Valga a provarlo, a titolo di esempio, la velocità della luce. Secondo la trasformazione classica tale velocità non dovrebbe essere la stessa in due *SC* in moto l'uno rispetto all'altro.

*M* Ciò prova soltanto che la trasformazione classica non può venire applicata, che la connessione fra due *SC* deve essere un'altra e che per stabilire tale legame nei confronti delle coordinate e delle velocità non è lecito seguire le leggi di trasformazione della meccanica. A queste leggi dobbiamo sostituirne delle nuove, che occorre ricavare dalle supposizioni fondamentali della teoria della relatività. Non preoccupiamoci della espressione matematica di questa nuova legge di trasformazione, che chiameremo brevemente *trasformazione di Lorentz*, e contentiamoci di sapere che essa è differente da quella della trasformazione classica. Si può provare

che le equazioni di Maxwell, vale a dire le leggi del campo, sono invarianti rispetto alla trasformazione di Lorentz, così come le leggi della meccanica sono invarianti rispetto alla trasformazione classica. Rammentiamo come stavano le cose nella fisica classica. Avevamo bensì leggi di trasformazione tanto per le coordinate, quanto per le velocità, ma le leggi della meccanica rimanevano le stesse per due SC in moto uniforme l'uno rispetto all'altro. Avevamo leggi di trasformazione per lo spazio, ma non per il tempo, che era lo stesso in tutti gli SC. Non è più così nella teoria della relatività in cui per lo spazio, per il tempo e per la velocità, abbiamo leggi di trasformazione differenti dalle classiche. Lo ripeto, le leggi della natura devono essere sempre le stesse in tutti gli SC in moto uniforme, gli uni relativamente agli altri. Le leggi della natura devono essere invarianti non già agli effetti della trasformazione classica, bensì agli effetti di un nuovo tipo di trasformazione: la trasformazione di Lorentz. In tutti gli SC inerziali le stesse leggi sono valide e il passaggio da un SC a un altro è dato dalla trasformazione di Lorentz.

A Vi credo sulla parola, ma vorrei sapere qual è la differenza fra la trasformazione classica e quella di Lorentz.

M Per rispondervi soddisfacentemente, citatemi i tratti più salienti della trasformazione classica e cercherò di spiegarvi se vengono conservati nella trasformazione di Lorentz o meno, e in caso negativo come vengono modificati.

A A un evento che nel mio SC si produce in un dato punto e in un dato istante, un osservatore in un altro SC, in moto uniforme relativamente al mio, assegnerà un numero differente alla posizione nella quale si produce l'evento ma uno stesso numero al tempo. In tutti i nostri SC si usa lo stesso orologio e non importa che l'orologio sia in moto o meno. Ciò è forse vero anche per voi?

M No, per me non è vero. Ogni SC dev'essere munito dei propri orologi a riposo poiché il moto ne modifica il ritmo. Due osservatori, in due SC diversi, assegneranno numeri differenti non soltanto alla posizione, ma anche al tempo in cui si produce l'evento.

A Ciò significa che il tempo non è più invariante. Nella trasformazione classica, il tempo è sempre il medesimo in tutti gli SC. Voi dite che nella trasformazione di Lorentz esso si comporta in certo qual modo come la coordinata spaziale nell'antica trasformazione. Vorrei ora sapere che cosa avviene con la distanza. Secondo

la meccanica classica un regolo rigido, sia esso in moto o a riposo, conserva la stessa lunghezza. È così anche per voi?

*M* Per me non è così. Infatti dalla trasformazione di Lorentz segue che un regolo in moto si contrae nella direzione del moto e che la contrazione aumenta con la velocità. Quanto più velocemente si muove il regolo, tanto più corto esso appare. Ma ciò non si verifica che nella direzione del moto. Nei miei primi due disegni (a pagina seguente) vedete un regolo la cui lunghezza è ridotta alla metà, allorché esso si muove con una velocità prossima al 90 per cento circa di quella della luce. Non c'è però contrazione nella direzione perpendicolare del moto, come ho cercato di porre in rilievo nei due ultimi disegni.

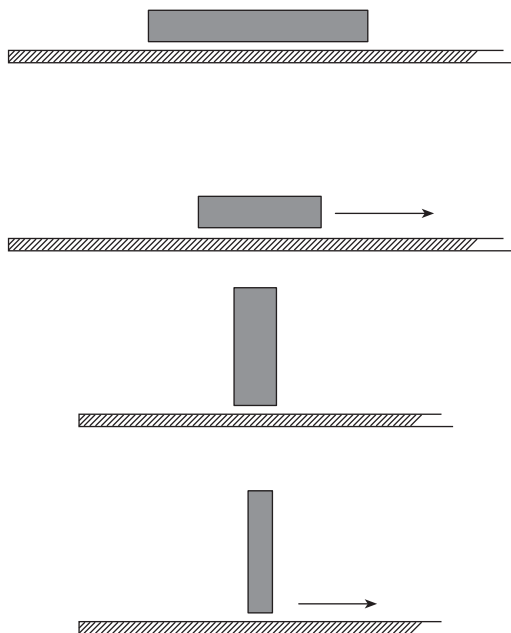
*A* Tutto ciò significa che il ritmo di un orologio e la lunghezza d'un regolo in moto dipendono dalla velocità. Ma in che modo?

*M* Le variazioni diventano sempre più notevoli man mano che la velocità aumenta. Dalla trasformazione di Lorentz scende che un regolo si ridurrebbe a nulla se la sua velocità potesse eguagliare quella della luce. Parimenti, un orologio in moto purché «buono» rallenta il proprio ritmo in confronto agli orologi davanti ai quali sfila lungo l'asta e si fermerebbe del tutto qualora la sua velocità eguagliasse quella della luce.

*A* Ciò sembra contraddire tutte le nostre esperienze. Sappiamo positivamente che una vettura in moto non si accorcia; sappiamo altresì che se l'orologio del conducente è «buono» esso contrariamente alle vostre affermazioni camminerà come gli orologi davanti ai quali passa lungo la strada.

*M* Questo è vero. Ma tali velocità meccaniche sono tutte piccolissime in confronto a quella della luce e sarebbe ridicolo voler applicare la relatività a simili fenomeni. Qualsiasi conducente di vetture può applicare con tutta tranquillità la fisica classica, anche aumentando centomila volte la propria velocità. Una discordanza fra l'esperienza e la trasformazione classica non si manifesta che per velocità vicine a quella della luce. È soltanto per le grandissime velocità che la trasformazione di Lorentz può venire comprovata.

*A* Ma scorgo un'ulteriore difficoltà. In base alla meccanica posso immaginare corpi dotati di velocità superiore a quella della luce. Un corpo in moto con la stessa velocità della luce relativamente a una nave in moto, si muove con la velocità superiore a quella del-



la luce relativamente alla riva. Che cosa avverrà del regolo la cui lunghezza si riduceva a nulla allorché la sua velocità eguagliava quella della luce? Dobbiamo forse ammettere che la lunghezza risulti negativa, allorché la velocità supera quella della luce?

*M* Il vostro sarcasmo non è affatto giustificato. Dal punto di vista della teoria della relatività un corpo materiale non può possedere una velocità superiore a quella della luce. Quest'ultima costituisce il limite massimo della velocità per tutti i corpi materiali. Se la velocità di un corpo eguaglia quella della luce relativamente a una nave in moto, essa eguaglierà altresì quella della luce rispetto alla riva. La legge meccanica della semplice addizione e sottrazione delle velocità non è più valida o in termini più precisi essa lo è approssimativamente per piccole velocità ma non per quelle che si avvicinano alla velocità della luce. Il numero esprimente la velocità della luce figura esplicitamente nella trasformazione di Lorentz, e vi assume la veste di caso limite, come la velocità infinita nella mecca-

nica classica. Questa teoria di carattere più generale non contraddice la trasformazione e la meccanica classica. Al contrario, vi ritroviamo gli antichi concetti quali caso limite, allorché le velocità sono piccole. Dal punto di vista della teoria della relatività è facile discernere in quali casi la fisica classica è valevole e quali ne sono le limitazioni. Sarebbe altrettanto ridicolo applicare la teoria della relatività al moto di vetture, di navi e di treni, quanto volersi servire di una macchina calcolatrice nei casi in cui basta la cosiddetta tavola pitagorica.



## Relatività e meccanica

La teoria della relatività sorse per necessità di cose dalle gravi e profonde contraddizioni insite nell'antica teoria, contraddizioni dalle quali sembrava non esserci via d'uscita. La forza della nuova teoria risiede nella coerenza e semplicità con cui tutte le difficoltà vengono risolte ricorrendo soltanto a pochi e plausibili presupposti.

Benché la teoria della relatività tragga origine dai problemi del campo, essa deve potersi applicare a tutte le leggi fisiche. Qui sembra presentarsi un ostacolo. Le leggi del campo e le leggi meccaniche sono d'indole del tutto diversa. Le equazioni del campo elettromagnetico sono invarianti rispetto alla trasformazione di Lorentz, mentre le equazioni della meccanica sono invarianti rispetto alla trasformazione classica o galileiana. Ma la teoria della relatività esige che tutte indistintamente le leggi della natura siano invarianti rispetto alla trasformazione di Lorentz anziché rispetto alla trasformazione galileiana. Quest'ultima si riduce allora a un caso speciale o caso limite della trasformazione di Lorentz, al caso cioè in cui le velocità relative di due *SC* sono molto piccole. Stando così le cose, la meccanica classica deve venir modificata in modo che essa possa soddisfare alla condizione di invariabilità rispetto alla trasformazione di Lorentz. In altre parole, non è ammissibile che la meccanica classica possa essere valida per velocità vicine a quella della luce. Nel passaggio da un *SC* a un altro, una sola trasformazione può essere valida: quella di Lorentz!

Non fu difficile modificare la meccanica classica di modo che essa non contraddicesse né la teoria della relatività, né la dovizia di nozioni ricavate dall'osservazione e spiegate con l'antica teoria.

Così, la meccanica classica rimane valida per velocità piccole, e viene a costituire il caso limite della meccanica relativistica.

È di grande interesse esaminare qualche esempio concreto, tratto dal novero delle modificazioni che la teoria della relatività ha introdotto nella meccanica classica. Ciò potrà condurci a conclusioni suscettibili di venir o ratificate o ripudiate dall'esperimento.

Immaginiamo un corpo di massa determinata, in moto rettilineo e sollecitato da una forza esterna che abbia la stessa direzione del moto. Come abbiamo visto la meccanica insegna che la forza è proporzionale alla variazione di velocità o accelerazione. In altri e più precisi termini: in un secondo, la velocità di un dato corpo può indifferentemente passare da 100 a 100 e 1 metro al secondo, o da 100 chilometri a 100 chilometri e 1 metro al secondo o ancora da 280 000 chilometri a 280 000 chilometri e 1 metro al secondo. E ciò perché la forza occorrente per produrre entro uno stesso intervallo di tempo la stessa accelerazione di un dato corpo è supposta essere sempre la stessa, qualunque ne sia la velocità.

Questa supposizione è forse ammissibile anche dal punto di vista della teoria della relatività? Decisamente no! La legge suddetta è valevole soltanto per piccole velocità. Qual è allora secondo la teoria della relatività la legge valevole per grandi velocità, vicine a quella della luce? La nuova legge è assai diversa dall'antica: occorrono forze estremamente grandi per accrescere la velocità, allorché questa è molto grande. Non è affatto la stessa cosa accrescere di 1 metro al secondo una velocità di 100 metri al secondo o una velocità prossima a quella della luce. Quanto più una velocità si avvicina a quella della luce e tanto più è difficile accrescerla. Allorché una velocità eguaglia quella della luce è impossibile accrescerla ulteriormente. Non c'è motivo di sorprendersi di queste innovazioni introdotte dalla teoria della relatività. La velocità della luce è infatti il limite massimo per tutte le velocità. Una velocità maggiore non può venire prodotta da nessuna forza finita, per grande che questa sia. L'antica legge meccanica che stabilisce un rapporto diretto fra forza e variazione di velocità viene sostituita da una legge più complessa. Dal nuovo punto di vista la meccanica classica può sembrare più semplice, ma ciò è dovuto al fatto che in pratica quasi tutte le velocità osservate sono molto inferiori a quella della luce.

Un corpo a riposo possiede una massa determinata, la cosiddetta *massa di riposo*. La meccanica insegna che qualsiasi corpo oppone resistenza a un mutamento del suo moto. Quanto maggiore è la massa, tanto più forte è la resistenza; o ancora: quanto minore è la massa, tanto più debole è la resistenza. Ma la teoria della relatività ci dice qualcosa di più. La resistenza che i corpi oppongono a un mutamento è tanto più forte non soltanto quanto maggiore è la loro massa a riposo, ma altresì quanto maggiore è la loro velocità. Corpi dotati di velocità vicine a quella della luce opporrebbero resistenze enormi alle forze esterne. Secondo la meccanica classica, la resistenza di un dato corpo è invariabile e caratterizzata unicamente dalla sua massa. Nella teoria della relatività la resistenza dipende da entrambi i fattori: massa di riposo e velocità del corpo. La resistenza diventa infinitamente grande allorché la velocità raggiunge quella della luce.

Tali conclusioni ci consentono di sottoporre la teoria alla prova sperimentale. Proiettili aventi velocità prossime a quella della luce resistono forse alla sollecitazione di forze esterne nel modo predetto dalla teoria? Dato che le affermazioni in proposito della teoria della relatività sono di carattere quantitativo, saremmo in grado di confermare o ripudiare la teoria stessa ove disponessimo di proiettili dotati di velocità vicine a quella della luce.

In effetti, la natura ci offre proiettili che possiedono velocità di questo ordine. Gli atomi della materia radioattiva – radio, ad esempio – si comportano come artiglierie capaci di sparare proiettili con velocità enormi. Senza entrare per ora in maggiori dettagli citeremo una soltanto delle importantissime vedute della fisica e della chimica moderna. Nell'universo tutta la materia si compone soltanto di pochissime specie di *particelle elementari*. È come se gli edifici di una città, pur avendo dimensioni, struttura e architettura molto diverse, fossero costruiti tutti – dalla tettoia al grattacielo – con alcune poche specie soltanto di mattoni. Del pari, nel nostro mondo materiale gli elementi conosciuti, dall'idrogeno, che è il più leggero, all'uranio che è il più pesante, sono tutti costruiti con le stesse specie di mattoni, vale a dire con le stesse specie di particelle elementari.

Gli elementi più pesanti, che corrispondono agli edifici più complessi, sono instabili e si disintegrano o come si dice sono *radioatti-*

*vi.* Alcuni dei mattoni, vale a dire le particelle elementari di cui gli elementi radioattivi si compongono, vengono talvolta espulse con velocità grandissime, vicine a quella della luce. Secondo le nostre attuali vedute, confermate da numerosi esperimenti, l'atomo di un elemento, poniamo il radio, possiede una struttura complessa e la disintegrazione radioattiva è uno dei tanti fenomeni attestanti che l'atomo si compone in realtà di mattoni più semplici, ossia di particelle elementari.

Mediante esperimenti assai complicati e ingegnosi è possibile accertare l'entità della resistenza che le particelle elementari in moto oppongono all'azione di una forza esterna. Gli esperimenti provano che la resistenza offerta dalle particelle dipende dalla velocità, come previsto dalla teoria della relatività. In vari altri casi nei quali è possibile accertare che la resistenza dipende dalla velocità, c'è accordo completo fra teoria ed esperimento. Qui riconosciamo nuovamente i caratteri essenziali del lavoro creativo nel campo scientifico: la predizione teorica di determinati eventi e la loro conferma sperimentale.

Tali risultati suggeriscono un'ulteriore e importante generalizzazione. Un corpo a riposo possiede massa, ma non possiede energia cinetica ossia energia di moto. Un corpo in movimento possiede entrambe le cose: massa ed energia cinetica. Esso resiste perciò alla variazione di velocità o accelerazione più fortemente del corpo a riposo. È come se l'energia cinetica del corpo in movimento accrescesse la sua resistenza. Di due corpi che possiedono la stessa massa di riposo, quello la cui energia cinetica è maggiore oppone maggior resistenza all'azione di una forza esterna.

Immaginiamo una scatola contenente delle sferette, l'una e le altre a riposo nel nostro sistema di coordinate, vale a dire la Terra. Per mettere la scatola in moto o per aumentarne la velocità occorre una data forza. Potrà questa forza accrescerne la velocità nella stessa misura e nello stesso intervallo di tempo anche qualora le sferette nell'interno della scatola si muovessero in tutti i sensi, come le molecole di un gas, ma con velocità media prossima a quella della luce? Occorrerà indubbiamente una forza maggiore in ragione dell'accresciuta energia cinetica delle sferette e della conseguente maggior resistenza che la scatola opporrà al moto. L'energia o quanto meno l'energia cinetica resiste al moto, come le masse ponderabili. Ma ciò è forse vero per tutte le specie o forme di energia?

A questa domanda la teoria della relatività dà una risposta chiara e netta, ricavata dai suoi presupposti fondamentali: una risposta, anche questa, di carattere quantitativo. *L'energia sotto tutte le sue forme si comporta come la materia*; un pezzo di ferro pesa più quando è caldo di quando è freddo; la radiazione emessa dal Sole attraverso lo spazio possiede energia e pertanto anche massa; il Sole e tutte le stelle radianti perdono massa emettendo radiazione. Questa conclusione di carattere quantitativo generale costituisce un'importante conquista della teoria della relatività e si accorda con tutti i fatti rispetto ai quali è stata messa alla prova.

La fisica classica aveva introdotto due sostanze: materia ed energia, la prima dotata di peso, la seconda imponderabile. In fisica classica si avevano perciò due leggi di conservazione, l'una per la materia, l'altra per l'energia. Abbiamo già avuto occasione di chiederci se la fisica moderna condivide le stesse idee in merito alle due sostanze e alle due leggi di conservazione. La risposta è stata ed è decisamente no! Secondo la teoria della relatività non c'è differenza essenziale fra massa ed energia. *L'energia possiede massa e la massa rappresenta energia*. In luogo di due leggi di conservazione ne abbiamo una sola: la legge di conservazione della massa-energia. Nell'ulteriore sviluppo della fisica questa veduta si è mostrata assai fortunata e feconda.

Come mai il fatto che l'energia possiede massa e che la massa rappresenta energia è rimasto così a lungo allo scuro? A p. 50 ci siamo domandati già una volta se un pezzo di ferro pesa più quando è rovente di quando è freddo. La risposta allora è stata: *no*; ora invece è *sì*! Ma il numero delle pagine che corrono tra queste due risposte non basta di certo a eliminare la contraddizione.

La difficoltà che ci si presenta qui è dello stesso genere di altre incontrate precedentemente. Nell'esempio appena citato la teoria della relatività prevede una variazione di massa talmente piccola, che non può venire accertata direttamente neanche con le bilance più sensibili. Tuttavia la prova che l'energia non manca di peso può raggiungersi seguendo diversi metodi assai concludenti, ancorché indiretti.

La causa di questa mancanza di prove immediate è il piccolissimo rapporto di scambio fra materia ed energia. Paragonata alla massa, l'energia è come una moneta molto deprezzata di fronte a un'altra

di altissimo valore. Un esempio chiarirà la situazione. La quantità di calore necessaria per convertire trentamila tonnellate di acqua in vapore non peserebbe più di un grammo circa! L'energia è stata considerata tanto a lungo imponderabile semplicemente perché la massa che essa rappresenta è così piccola.

La vecchia «energia sostanza» è la seconda vittima della teoria della relatività. La prima vittima fu il mezzo che doveva servire alla propagazione delle onde luminose.

La teoria della relatività ha una portata che oltrepassa di molto il problema dal quale sorse. Essa elimina le difficoltà e le contraddizioni della teoria del campo; formula leggi meccaniche di carattere più generale; sostituisce una sola legge alle due leggi di conservazione; sovverte il concetto classico del tempo assoluto. La sua validità non è limitata a un ramo della fisica soltanto; essa costituisce un'armatura strutturale che abbraccia tutti i fenomeni della natura.

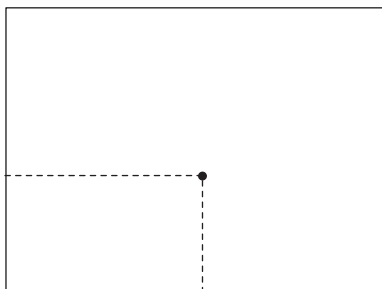
## Il continuo spazio-temporale

«La Rivoluzione francese scoppiò a Parigi il 14 luglio 1789». Con questa frase vengono indicati luogo e data di un evento. Qualcuno che udisse questa frase per la prima volta e non sapesse ciò che significa «Parigi», potrebbe venir informato nel modo seguente: «è una città della Terra, a 2 gradi di longitudine Est e 49 gradi di latitudine Nord». Questi due numeri indicherebbero allora il luogo e «14 luglio 1789» il tempo in cui l'evento s'è prodotto. Nella fisica, molto più che nella storia, l'indicazione esatta del tempo e del luogo in cui un evento si è prodotto è di grandissima importanza, poiché tali dati costituiscono la base della descrizione quantitativa.

Per motivi di semplicità abbiamo finora considerato soltanto il moto rettilineo. Il nostro SC era semplicemente costituito da un'asta rigida, dotata di origine, ma senza estremità finale. Atteniamoci ancora a questa semplificazione. Consideriamo punti diversi lungo l'asta; la posizione di ognuno di essi può venir determinata mediante un solo numero, la cosiddetta *coordinata* del punto. Dire che la coordinata di un punto è 2,516 metri, è come dire che la sua distanza dall'origine dell'asta è di 2,516 metri. Se, in cambio, ci vien dato un certo numero e una unità di misura è sempre possibile trovare un punto, lungo l'asta, corrispondente a tale numero. Possiamo dunque dire: un determinato punto dell'asta corrisponde a ogni numero e un determinato numero corrisponde a ogni punto. Questo fatto viene enunciato dai matematici mediante la seguente proposizione: tutti i punti dell'asta costituiscono un *continuo unidimensionale*. Per ogni punto dell'asta ne esiste un altro che gli è tanto vicino quanto si vuole. Possiamo congiungere due punti qualsiasi dell'asta avanzando a passi brevi quanto vogliamo. La picco-

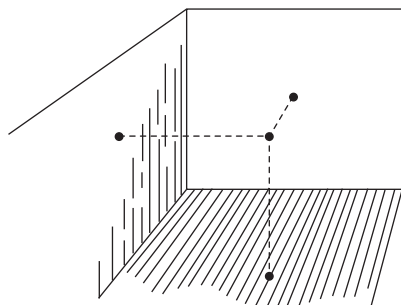
lezza arbitraria dei passi congiungenti due punti distanti è la caratteristica del continuo.

Ricorriamo a un altro esempio. Consideriamo un piano o, se preferite qualcosa di più concreto, la superficie di una tavola rettangolare. La posizione di un punto sulla tavola può venir determinata mediante due numeri e non più mediante uno di essi soltanto, come nel caso precedente. I due numeri marcano le distanze, fra loro perpendicolari, del punto dai due bordi della tavola. Non è un solo numero, bensì una coppia di numeri che corrisponde a ogni punto del piano; inversamente a ogni coppia di numeri corrisponde un determinato punto del piano. In altri termini, il piano è un *continuo bidimensionale*. Per ogni punto del piano ne esistono altri che gli sono vicini tanto quanto si vuole. Due punti distanti possono venir congiunti da una curva, che possiamo suddividere in tante parti quante vogliamo. Pertanto la piccolezza arbitraria dei passi che congiungono due punti distanti, ognuno dei quali può venire rappresentato da due numeri, è caratteristica per il continuo bidimensionale.



Un terzo esempio. Supponiamo che vogliate considerare una stanza come vostro *SC*. Ciò significa che volete descrivere tutte le posizioni, riferendole alle pareti supposte rigide. La posizione della cima di una lampada, a riposo, può venir descritta da tre numeri, due dei quali determinano la distanza da due muri perpendicolari e il terzo la distanza dal pavimento o dal soffitto. A ogni punto dello spazio corrispondono tre numeri, e a ogni gruppo di tre numeri corrisponde un punto dello spazio. Il che si esprime con la pro-





posizione: il nostro spazio è un *continuo tridimensionale*. Per ogni punto dello spazio ne esistono altri che gli sono tanto vicini quanto si vuole. Di nuovo la piccolezza arbitraria dei passi congiungenti punti distanti, rappresentati ognuno da tre numeri, è caratteristica per il continuo tridimensionale.

Ma tutto ciò non è precisamente fisica. Per tornare a quest'ultima occorre considerare il moto di particelle materiali. Volendo osservare e prevedere gli eventi della natura occorre considerare non soltanto il luogo, ma anche il tempo in cui si producono i fenomeni fisici. Citeremo un esempio semplicissimo.

Lasciamo cadere da una torre, alta diciamo 78 metri, un sassolino, assimilabile a una particella. Dall'epoca di Galileo siamo in grado di determinare anticipatamente la coordinata del sassolino, in un istante qualsiasi, a partire da quello in cui inizia la caduta. Ecco un «orario» descrivente le posizioni del sassolino dopo 0, 1, 2, 3, 4 secondi:

Tempo in secondi	Altezza in metri
0	78
1	68
2	55
3	32
4	0

Il nostro «orario» registra cinque eventi, ognuno dei quali è rappresentato da due numeri, la coordinata di tempo e la coordinata di spazio. Il primo evento è l'inizio della caduta dall'altezza di 78

metri, a zero secondi. Al secondo evento è la coincidenza del sassolino con la nostra asta rigida (la torre) all'altezza di 68 metri, il che si verifica dopo un secondo. L'ultimo evento è la coincidenza del sassolino con il suolo.

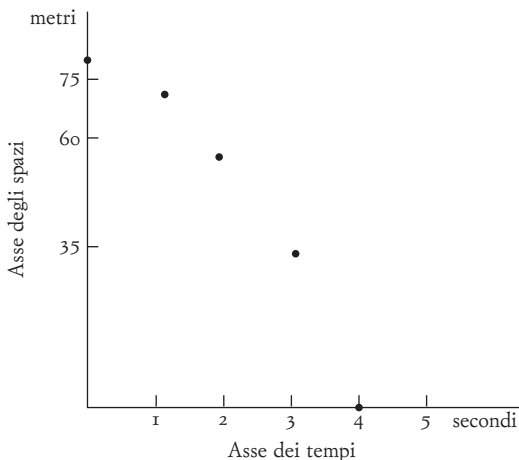
Le informazioni forniteci dal nostro «orario» possono venir presentate anche sotto altra forma. Possiamo rappresentare le cinque coppie di numeri del nostro orario mediante cinque punti in un piano. Stabiliamo anzitutto una scala; l'uno dei due segmenti qui sotto rappresenterà 20 metri, l'altro un secondo:



Tracciamo ora due linee perpendicolari l'una all'altra, chiamando asse dei tempi la linea orizzontale e asse degli spazi la linea verticale. Si vede senz'altro che il nostro «orario» può venire rappresentato da cinque punti nel nostro piano del tempo-spazio.

Le distanze dei singoli punti dall'asse degli spazi rappresentano le coordinate di tempo registrate nella prima colonna del nostro «orario» e le distanze dall'asse dei tempi le rispettive coordinate di spazio.

Esattamente la stessa cosa è dunque espressa in due modi diversi: mediante l'«orario» e mediante i punti nel piano. Ognuno dei due

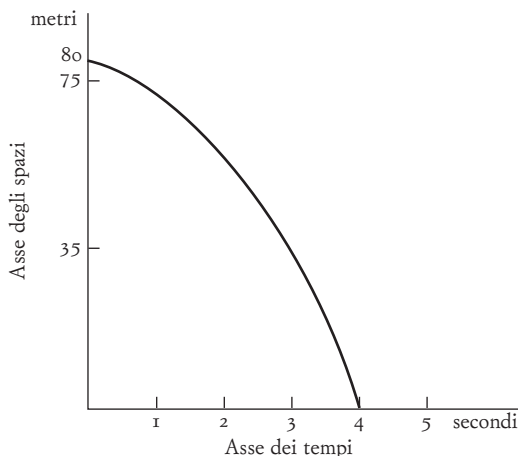


modi di rappresentazione può venir desunto dall'altro. La scelta fra i due è questione di gusto, perché in realtà essi sono equivalenti.

Facciamo un passo avanti. Immaginiamo un «orario» più preciso, che indichi le posizioni non più di secondo in secondo, ma per ogni centesimo o millesimo di secondo. Avremo allora un grande numero di punti nel nostro piano del tempo-spazio. Finalmente, se la posizione è indicata per ogni istante, o se, come dicono i matematici, la coordinata di spazio è data in funzione del tempo, la nostra serie di punti diviene una linea continua. Il tracciato che segue non rappresenta più, come prima, una conoscenza frammentaria, bensì una conoscenza completa del moto.

Il moto lungo un'asta rigida (la torre), vale a dire il moto unidimensionale è ora rappresentato da una curva nel continuo del tempo-spazio a due dimensioni. A ogni punto del nostro continuo del tempo-spazio corrisponde una coppia di numeri, uno dei quali misura la coordinata di tempo e l'altro la coordinata di spazio. Inversamente, a ogni coppia di numeri caratterizzante un evento corrisponde un determinato punto nel nostro piano del tempo-spazio. Due punti adiacenti rappresentano due eventi che si producono in luoghi e in istanti leggermente differenti.

Contro questa raffigurazione potreste sollevare l'obiezione seguente: non ha gran senso rappresentare un'unità di tempo median-



te un segmento e poi combinarla meccanicamente con lo spazio, formando così il continuo bidimensionale per mezzo di due continui unidimensionali. Vi risponderò allora che potreste con altrettanto fondamento protestare contro tutti i grafici come, ad esempio, quelli che rappresentano le variazioni di temperatura a Roma, durante l'ultima estate, e quelli rappresentanti le variazioni del costo della vita durante gli ultimi anni, poiché in tali casi si applica lo stesso metodo. Nei grafici delle temperature il continuo unidimensionale temperatura viene accoppiato al continuo unidimensionale tempo, per formare il continuo bidimensionale temperatura-tempo.

Torniamo alla particella che viene lasciata cadere da una torre alta 78 metri. La nostra rappresentazione grafica del moto è una convenzione utile, poiché essa caratterizza la posizione della particella in un istante qualsiasi. Conoscendo il moto della particella possiamo rappresentarlo in due maniere diverse.

Consideriamo anzitutto i mutamenti di posizione della particella con il tempo nello spazio unidimensionale. In tal caso il moto viene rappresentato come una sequenza di eventi nel continuo unidimensionale di spazio. Non c'è accoppiamento fra tempo e spazio e si ha perciò una immagine *dinamica*, in cui le posizioni mutano con il tempo.

Ma del medesimo moto possiamo anche dare una rappresentazione diversa e cioè un'immagine *statica*, mediante una curva nel continuo bidimensionale del tempo-spazio. Il moto viene allora rappresentato come qualcosa che *realmente* è, che esiste nel continuo bidimensionale del tempo-spazio e non più come qualcosa che muta nel continuo dello spazio a una dimensione. Questi due modi di rappresentazione sono rigorosamente equivalenti e preferire l'uno all'altro è questione di mero gusto e convenzione.

Quanto è stato detto a proposito delle due rappresentazioni del moto non ha nulla a che fare con la teoria della relatività. Entrambe le rappresentazioni possono usarsi con uguale fondamento, sebbene la fisica classica abbia dato la preferenza alla rappresentazione dinamica, descrivendo il moto come una sequenza di eventi nello spazio anziché come cosa esistente nel tempo-spazio. Ma la teoria della relatività non ha seguito lo stesso criterio. Essa si è pronunciata nettamente per l'immagine statica, trovando che rappresentare il moto come cosa esistente nel tempo-spazio offre una più conveniente e

obiettiva immagine della realtà. Rimane però da rispondere alla seguente domanda: perché queste due rappresentazioni del tutto equivalenti dal punto di vista della fisica classica non lo sono anche dal punto di vista della teoria della relatività?

Si comprenderà la risposta se si considerano nuovamente due *SC* in moto uniforme, l'uno relativamente all'altro.

Secondo la fisica classica, gli osservatori in due *SC* in moto uniforme l'uno rispetto all'altro faranno corrispondere a un determinato evento coordinate spaziali diverse ma una stessa coordinata di tempo. Così nel nostro ultimo esempio, la coincidenza della particella con il suolo è caratterizzata dalla coordinata di tempo «4» e dalla coordinata spaziale «zero». In base alla meccanica classica, il sassolino urterà il suolo dopo 4 secondi anche per un osservatore in moto uniforme relativamente all'*SC* prescelto. Ma questo osservatore riferirà la distanza al proprio *SC* e in via generale assegnerà coordinate di spazio differenti all'evento dell'urto, mentre la coordinata di tempo resterà la stessa per lui come per tutti gli altri osservatori in moto uniforme, gli uni relativamente agli altri. La fisica classica non conosce che il flusso di un *tempo assoluto* per tutti gli osservatori. Per ogni *SC* il continuo bidimensionale può venire scisso in due continui unidimensionali: tempo e spazio. In ragione del carattere «assoluto» attribuito al tempo, il passaggio dell'immagine «statica» all'immagine «dinamica» possiede, nella fisica classica, un significato obiettivo.

Ma ci siamo già lasciati convincere che, in linea generale, nella fisica non si deve far uso della trasformazione classica. Dal punto di vista pratico questa è utile per piccole velocità, ma cessa di esserlo allorché si debbano trattare questioni fondamentali e decisive della fisica.

Secondo la teoria della relatività l'istante di tempo in cui il sassolino urta il suolo non è lo stesso per tutti gli osservatori. Anche la coordinata di tempo, e non soltanto la coordinata di spazio, sarà differente in due *SC* diversi e la variazione della coordinata di tempo sarà notevolissima qualora la velocità relativa si avvicini a quella della luce. Pertanto non è più lecito scindere, come nella fisica classica, il continuo bidimensionale in due continui unidimensionali. Spazio e tempo non vanno considerati separatamente allorché si determinano le coordinate del tempo-spazio in un altro *SC*. La

scissione del continuo bidimensionale in due continui unidimensionali è, dal punto di vista della teoria della relatività, un procedimento arbitrario, privo di significato oggettivo.

Sarà ora agevole estendere quanto abbiamo appena esposto al caso in cui il moto non è più soltanto rettilineo. In realtà non sono solamente due, bensì quattro i numeri occorrenti per descrivere gli eventi della natura. Il nostro spazio fisico, così come lo concepiamo per il tramite degli oggetti e del loro moto, possiede tre dimensioni e le posizioni vengono caratterizzate da tre numeri. L'istante in cui si verifica l'evento è il quarto numero. A ogni evento corrispondono quattro numeri determinati e un gruppo di quattro numeri corrisponde a un evento determinato. Pertanto il mondo degli eventi costituisce un *continuo quadridimensionale*. In tutto ciò non vi è nulla di misterioso e l'ultima nostra proposizione è altrettanto vera per la fisica classica come per la teoria della relatività. Contrasti si manifestano nuovamente ove si considerino due SC in moto, l'uno relativamente all'altro. Immaginiamo una stanza in moto, e degli osservatori nell'interno e all'esterno di essa, che determinano le coordinate del tempo-spazio dei medesimi eventi. Il fisico classico scinde nuovamente il continuo quadridimensionale nei due continui: il tridimensionale dello spazio e l'unidimensionale del tempo. Il fisico antico non si cura che della trasformazione spaziale, poiché il tempo per lui è assoluto. Egli trova naturale e conveniente la scissione del continuo cosmico quadridimensionale in spazio e tempo. Ma dal punto di vista della teoria della relatività allorché si passa da un SC all'altro il tempo subisce una variazione, come avviene con lo spazio, ed è la trasformazione di Lorentz che tiene conto delle proprietà di trasformazione del *continuo spazio-temporale* a quattro dimensioni del nostro mondo quadridimensionale degli eventi.

Il mondo degli eventi può venir descritto dinamicamente mediante un'immagine mutevole con il tempo e proiettata sullo sfondo dello spazio tridimensionale. Ma può anche venir descritto mediante un'immagine statica, proiettata sullo sfondo del continuo spazio-temporale a quattro dimensioni. Dal punto di vista della fisica classica le due immagini, la dinamica e la statica, sono equivalenti. Ma dal punto di vista della relatività, l'immagine statica è più conveniente e più obiettiva.

Tuttavia anche nella teoria della relatività si può sempre, ove lo si preferisca, valersi dell'immagine dinamica. Ma allora non dobbiamo dimenticare che la scissione in tempo e spazio non ha significato oggettivo, poiché il tempo non è più «assoluto». Nelle pagine seguenti faremo ancora uso del linguaggio «dinamico» anziché di quello «statico», senza però perdere di vista le corrispondenti limitazioni.

## La relatività generale

Una delle più fondamentali questioni attende tuttora risposta: esiste un sistema inerziale? Sappiamo già che le leggi della natura sono invarianti rispetto alla trasformazione di Lorentz e valide per tutti i sistemi inerziali in moto uniforme gli uni relativamente agli altri. Ma se conosciamo le leggi, non conosciamo ancora il quadro cui riferirle.

Per meglio renderci conto di questa difficoltà intervisteremo il fisico classico per porgli alcuni quesiti elementari.

– Che cos'è un sistema inerziale?

– È un SC nel quale le leggi della meccanica sono valide. In tale SC un corpo sul quale non agisce nessuna forza esterna si muove uniformemente. Questa proprietà ci mette in grado di distinguere un sistema inerziale da ogni altro.

– Ma che cosa si deve intendere quando dite che nessuna forza agisce su un corpo?

– Ciò vuol dire semplicemente che il corpo si muove uniformemente in un SC inerziale.

Qui potremmo ripetere la domanda: «Che cos'è un SC inerziale?» Ma essendoci poca speranza di ottenere una risposta diversa da quella di poco fa, tentiamo di procurarci qualche informazione concreta, modificando le parole:

– Un SC rigidamente collegato alla Terra è forse un SC inerziale?

– No, perché le leggi della meccanica non sono rigorosamente valide sulla Terra, a causa della sua rotazione. Per molti problemi un SC rigidamente collegato al Sole può venir considerato come inerziale; ma tenuto conto che anche questo astro è animato di un



moto di rotazione, è evidente che neanche un *SC* rigidamente collegato al Sole può venir considerato come rigorosamente inerziale.

– Ma che cos'è, in concreto, il vostro *SC* inerziale? Quale stato di movimento gli va attribuito?

– È semplicemente una finzione utile, ma non ho nessuna idea come essa possa realizzarsi. Se con il mio *SC* potessi allontanarmi sufficientemente da tutti i corpi materiali, e liberarmi così da tutte le influenze esterne, allora soltanto il mio *SC* sarebbe veramente inerziale.

– Ma che cosa intendete per un *SC* libero da tutte le influenze esterne?

– È precisamente un *SC* inerziale.

Ci troviamo dunque di nuovo davanti alla nostra prima domanda.

La nostra intervista ci rivela una grave difficoltà, insita nella fisica classica. Abbiamo bensì delle leggi, ma non sappiamo a quale quadro riferirle, cosicché l'intero edificio della fisica appare fondato sulla sabbia.

Possiamo abordare la stessa difficoltà da un punto di vista diverso. Immaginiamo che nell'universo intero non ci sia che un solo corpo e che esso costituisca il nostro *SC*. Questo corpo comincia a prendere un moto di rotazione. Secondo la meccanica classica, le leggi per un corpo in rotazione sono diverse da quelle per un corpo che non si trova in rotazione. Cosicché se il principio d'inerzia è valevole in un caso, non lo è nell'altro. Ma tutto ciò è assai dubbio. È lecito forse considerare il moto di un solo corpo nell'intero universo? Per moto di un corpo intendiamo sempre il suo mutamento di posizione rispetto a un altro corpo. È perciò contrario al buon senso parlare del moto di un solo corpo. Meccanica classica e senso comune sono, su questo punto, in completo disaccordo. Rammentiamo il precetto di Newton: se il principio d'inerzia è valido, l'*SC* si trova o a riposo o in moto uniforme; se il principio d'inerzia non è valido, l'*SC* si trova in moto non uniforme. Quindi, per decidere se c'è moto o se c'è riposo bisogna prima sapere se tutte le leggi fisiche sono applicabili o meno all'*SC* prescelto.

Consideriamo due corpi, ad esempio, il Sole e la Terra. Il moto che osserviamo è, anche in questo caso, *relativo*. Esso può venir descritto collegando l'*SC* sia alla Terra, sia al Sole. Da questo punto di vista la grande scoperta di Copernico consiste nell'avere tra-

sferito l'*SC* dalla Terra al Sole. Ma dato che il moto è relativo e che è lecito servirsi di un sistema di riferimento qualsiasi, sembra non esserci motivo di dare la preferenza all'uno piuttosto che all'altro di tali *SC*.

Qui la fisica interviene nuovamente e modifica il punto di vista del senso comune. L'*SC* collegato al Sole è, come sistema inerziale, meglio qualificato di quello collegato alla Terra. Le leggi fisiche si applicano meglio all'*SC* di Copernico che non a quello di Tolomeo. Il grande merito della scoperta di Copernico non può venir apprezzato che dal punto di vista della fisica. Esso consiste nei notevoli vantaggi offerti da un *SC* rigidamente collegato al Sole, per la descrizione del moto dei pianeti.

Nella fisica classica il moto uniforme assoluto non esiste. Se due *SC* sono animati di moto uniforme l'uno rispetto all'altro, non ha senso dire: «Questo *SC* si trova a riposo e l'altro si trova in moto». Se invece due *SC* effettuano movimenti non uniformi l'uno rispetto all'altro, allora vi è un'ottima ragione per dire: «Questo corpo si muove e quest'altro è a riposo (o si muove uniformemente)». Il moto assoluto possiede in tal caso un significato ben definito. Un abisso separa qui il senso comune dalla fisica classica. Le difficoltà ora prospettate, quelle cioè attinenti all'esistenza di un sistema inerziale e di un moto assoluto, sono intimamente connesse l'una all'altra. La presunzione del moto assoluto scende dall'idea di un sistema inerziale nel quale le leggi della natura sono valevoli.

Si è indotti a credere che non ci sia via d'uscita da queste difficoltà e che nessuna teoria fisica possa evitarle. Esse hanno radice nella limitazione della validità delle leggi della natura a un tipo speciale di *SC*, e cioè l'*SC* inerziale. La possibilità di superare le difficoltà in questione dipende dunque dalla risposta al quesito seguente: Possiamo formulare le leggi della fisica in modo che esse siano valide per tutti gli *SC* indistintamente, vale a dire non soltanto per quelli in moto uniforme ma anche per quelli in moto arbitrario gli uni relativamente agli altri? Se vi riuscissimo le nostre difficoltà avrebbero termine. Qualora potessimo applicare le leggi della natura a qualsiasi *SC*, il conflitto così violento, agli esordi della scienza, fra il punto di vista di Tolomeo e quello di Copernico non avrebbe più senso. Potremmo adottare l'uno o l'altro a uguale diritto. Le due proposizioni: «il Sole è immobile e la Terra gira» e «il Sole gira

e la Terra è immobile» avrebbero semplicemente il significato di due convenzioni diverse concernenti due SC diversi.

Siamo in grado di costruire una fisica realmente relativista, valida in tutti gli SC, una fisica cioè nella quale non vi sia più posto per il moto assoluto ma soltanto per il moto relativo? Sì, è fattibile!

Possediamo per lo meno un'indicazione, benché piuttosto vaga, sul come costruire una nuova fisica. La fisica realmente relativista deve potersi applicare a tutti gli SC indistintamente e, pertanto, anche nel caso speciale dell'SC inerziale. Le nuove leggi generali valide per tutti gli SC devono, nel caso speciale del sistema inerziale, potersi ricondurre alle leggi già note.

Il problema di formulare le leggi della fisica per qualsiasi SC è stato risolto dalla *teoria della relatività generale*; la teoria che l'ha preceduta e che si applica soltanto ai sistemi inerziali è chiamata *teoria della relatività speciale*. Naturalmente le due teorie non possono contraddirsi, poiché le vecchie leggi della relatività speciale vanno incluse nelle leggi generali, valevoli per un sistema inerziale. Se tutti gli SC in moto arbitrario gli uni relativamente agli altri devono essere ammissibili, è chiaro che l'SC inerziale, limitatamente al quale le leggi fisiche vennero inizialmente formulate, non costituirà più che un caso limite speciale.

Questo è precisamente il programma che la teoria della relatività generale si propone. Ma nel delineare la via seguita per arrivare alla meta, siamo costretti a tenerci nel vago ancor di più di quanto abbiamo fatto finora. Nel corso dello sviluppo scientifico sorgono in ogni momento nuovi ostacoli che impongono alla teoria carattere sempre più astratto. Ci attendono ancora avventure imprevedute. Ma il nostro scopo finale resta pur sempre quello di una migliore comprensione della realtà. Nuovi anelli si aggiungono continuamente alla catena logica che unisce la teoria all'osservazione. Dobbiamo allungare sempre più la catena se vogliamo liberare da supposizioni superflue e artificiose la via che conduce dalla teoria all'esperienza e se vogliamo abbracciare un dominio dei fatti sempre più vasto. Più le nostre supposizioni diventano semplici e fondamentali e più gli ingranaggi matematici del nostro ragionamento si complicano. La via che dalla teoria conduce all'osservazione diventa sempre più lunga e più ardua. Per quanto paradossale possa sembrare, possiamo dire: La fisica moderna è più semplice dell'antica e sembra per-

ciò più difficile e più complicata. Quanto più semplice è la nostra immagine del mondo esterno e tanto maggiore è la dovizia dei fatti che essa abbraccia e tanto più perfetto è il riflesso dell'armonia universale che essa induce nel nostro spirito.

La nostra idea è semplice: costruire una fisica valevole per tutti gli SC. Ma la sua attuazione comporta complicazioni d'ordine formale e ci costringe a ricorrere a ingranaggi matematici diversi da quelli anteriormente in uso nella fisica. Qui dobbiamo però limitarci ad additare le connessioni fra l'attuazione del nostro proposito e due dei principali problemi: la gravitazione e la geometria.

## Fuori e dentro l'ascensore

La legge dell'inerzia segna il primo grande progresso nella fisica; può anche dirsi il suo inizio. Essa è stata ricavata dalla considerazione di un esperimento ideale: un corpo in moto per l'eternità, libero da attrito e da ogni sollecitazione di forze esterne. Questo esempio e diversi altri ci hanno messo in grado di riconoscere tutta l'importanza dell'esperimento ideale, pura figliazione del pensiero.

Discuteremo ora alcuni altri esperimenti ideali. Benché possano sembrare fantastici, essi ci aiuteranno nondimeno a capire quel tanto della teoria della relatività compatibile con i metodi elementari qui seguiti.

Più su siamo ricorsi ai vari esperimenti ideali con la stanza in moto uniforme. Questa volta ci serviremo di un ascensore in caduta libera.

Immaginiamo un immenso ascensore, all'ultimo piano di un grattacielo molto, ma molto più alto di quelli che esistono realmente. Di colpo si spezza il cavo che sostiene la cabina e questa comincia a cadere liberamente. Degli osservatori che si trovano nel suo interno effettuano durante la caduta alcuni esperimenti. Al descriverli non ci cureremo né della resistenza dell'aria, né dell'attrito, essendo ciò perfettamente compatibile con un esperimento ideale. Uno degli osservatori lascia cadere un fazzoletto e un orologio. Che cosa accadrà a questi due corpi? Per un osservatore all'esterno, che guarda attraverso la finestra della cabina, fazzoletto e orologio cadono entrambi esattamente allo stesso modo, con la stessa accelerazione. Rammentiamo che l'accelerazione di un corpo in caduta è del tutto indipendente dalla sua massa e che fu precisamente questo fatto che rivelò l'equivalenza della massa pesante e della massa inerte

(p. 44). Rammentiamo inoltre che l'equivalenza delle due masse, la pesante e l'inerte, era, dal punto di vista della meccanica classica, meramente accidentale e non interveniva affatto nella struttura di questa dottrina. Qui invece, tale equivalenza, che si riflette nel fatto che i corpi in caduta hanno tutti la stessa accelerazione, è essenziale e serve di base a tutta la nostra argomentazione.

Torniamo al nostro fazzoletto e al nostro orologio in caduta. Per l'osservatore esterno entrambi i corpi cadono con la stessa accelerazione. Ma altrettanto avviene con la cabina (pareti, pavimento, soffitto). Pertanto la distanza fra i due corpi e il pavimento non varierà. Per l'osservatore interno entrambi i corpi resteranno esattamente allo stesso posto che occupavano quando li lasciò liberi. Egli infatti può ignorare il campo gravitazionale, perché la causa di questo risiede al di fuori del suo *SC*. Egli constata che, nell'interno dell'ascensore, nessuna forza agisce sui due corpi, i quali restano in riposo come se si trovassero in un *SC* inerziale. Dentro la cabina in caduta libera avvengono cose insolite! Se l'osservatore dà una spinta a un corpo in una direzione qualsiasi, ad esempio verso l'alto o verso il basso, il corpo continuerà a muoversi uniformemente fin quando urterà il soffitto o il pavimento. In breve, le leggi della meccanica classica sono valide per l'osservatore nell'interno dell'ascensore; tutti i corpi vi si comportano conformemente alle leggi d'inerzia. Il nostro nuovo *SC*, rigidamente collegato all'ascensore in caduta libera, differisce in un sol punto dall'*SC* inerziale propriamente detto. In quest'ultimo un corpo in moto sul quale non agisce nessuna forza esterna si muove uniformemente senza fine; l'*SC* inerziale, come esso viene rappresentato dalla fisica classica, non è limitato né nello spazio, né nel tempo. Ma per l'osservatore nel nostro ascensore il caso è diverso. Il carattere inerziale del suo *SC* è limitato nello spazio e nel tempo. Per grande che sia la cabina, presto o tardi il corpo in moto uniforme urterà contro una parete e il suo moto uniforme verrà distrutto. Presto o tardi la cabina urterà il suolo e gli osservatori e le loro esperienze verranno distrutti. Il nostro *SC* non è che un'«edizione tascabile» di un *SC* inerziale propriamente detto.

Questa limitazione locale del nostro *SC* è assolutamente essenziale. Se la cabina del nostro ascensore immaginario si estendesse dal

Polo Nord fino all'Equatore e se il fazzoletto fosse lasciato cadere al Polo Nord e l'orologio all'Equatore, i due corpi non avrebbero più la stessa accelerazione per l'osservatore esterno; essi non sarebbero più a riposo, l'uno rispetto all'altro. La nostra intera argomentazione cadrebbe. Le dimensioni dell'ascensore devono essere limitate, in modo che l'uguaglianza dell'accelerazione di tutti i corpi relativamente all'osservatore esterno possa venir ammessa.

Con questa restrizione l'*SC* riveste carattere inerziale per l'osservatore interno. Possiamo così indicare almeno un *SC* nel quale tutte le leggi fisiche sono valide, ancorché esso sia circoscritto nel tempo e nello spazio. Se immaginiamo un altro *SC*, un altro ascensore in moto uniforme rispetto all'ascensore in caduta libera, allora entrambi gli *SC* saranno dei sistemi localmente inerziali. Tutte le leggi saranno esattamente le stesse nell'uno e nell'altro. Il passaggio dall'uno all'altro sarà dato dalla trasformazione di Lorentz.

Vediamo ora in quale maniera i due osservatori, l'uno nell'interno e l'altro all'esterno, giudicano ciò che avviene nella cabina in caduta libera.

Il moto di questa cabina, e di tutti i corpi nel suo interno, si verifica per l'osservatore esterno in conformità alla legge di gravità di Newton. Il moto che egli osserva non è uniforme, bensì accelerato, per effetto del campo gravitazionale della Terra.

Ma dei fisici nati ed educati nella cabina ragionerebbero in modo del tutto diverso. Essi riterrebbero di disporre di un sistema inerziale e riferirebbero tutte le leggi della natura al loro ascensore, giustificando tale procedimento con il fatto che nel loro *SC* tali leggi rivestono forma particolarmente semplice. Sarebbe perfettamente naturale per loro supporre che il loro ascensore è a riposo e che esso è un *SC* inerziale.

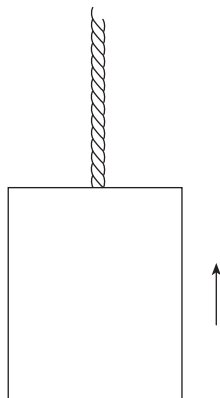
È impossibile pronunciarsi sulle divergenze fra i punti di vista dell'osservatore esterno e di quello interno. Ognuno di essi potrebbe rivendicare il diritto di riferire tutti gli eventi al proprio *SC* e le due descrizioni degli eventi potrebbero essere ugualmente coerenti.

Questo esempio c'insegna che una descrizione coerente dei fenomeni fisici, in due *SC* diversi, è possibile anche se questi non si trovano in moto uniforme l'uno relativamente all'altro. Tuttavia tale descrizione richiede che si tenga conto della gravitazione, ai fini di

disporre, per così dire, di un «ponte», che consenta il passaggio da un *SC* all'altro. Il campo gravitazionale esiste per l'osservatore esterno; non esiste per l'osservatore interno. Il moto accelerato dell'ascensore soggetto al campo gravitazionale esiste per l'osservatore esterno, mentre l'osservatore interno non nota che riposo e assenza di campo gravitazionale. Tuttavia il «ponte», vale a dire il campo gravitazionale, mediante il quale la descrizione logica in entrambi gli *SC* diviene possibile, riposa su un pilastro assai solido: l'equivalenza della massa pesante e della massa inerte. Senza tale equivalenza, passata inosservata nella meccanica classica (p. 44), i nostri argomenti non avrebbero base.

Ricorriamo ora a un altro esempio ideale alquanto diverso. Assumiamo un *SC* nel quale valga la legge dell'inerzia. Abbiamo già descritto ciò che avviene dentro un ascensore a riposo in un simile *SC* inerziale. Modifichiamo ora la nostra rappresentazione. Immaginiamo un ascensore tirato con forza costante verso l'alto, come mostra il disegno che segue, da qualcuno situato all'esterno che abbia attaccato una corda al soffitto.

Poco importa sapere come ciò possa farsi. Dato che nel nostro *SC* le leggi della meccanica sono valide, l'ascensore si muoverà con una accelerazione costante nella direzione del moto. Sentiamo ora le spiegazioni che l'osservatore esterno e quello interno danno dei fenomeni che si producono nella cabina.





*Osservatore esterno* Il mio SC è inerziale. Vedo l'ascensore muoversi con accelerazione costante, causa la forza costante che agisce su di esso. Le persone nell'interno si trovano in moto assoluto. Per loro le leggi della meccanica non valgono. Per loro non è vero che i corpi sui quali non si esercita nessuna forza si trovano a riposo. Un corpo lasciato cadere dentro la cabina urta presto il pavimento, poiché questo si muove verso l'alto e gli viene incontro. Ciò si produce esattamente nello stesso modo per un orologio e per un fazzoletto. Per quanto ciò possa sembrare strano, le persone nell'interno non sono in grado di lasciare il «pavimento», perché se spiccano un salto il pavimento che è in moto verso l'alto le raggiunge subito.

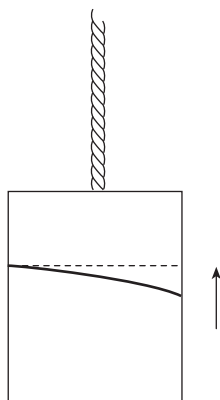
*Osservatore interno* Non vedo nessuna ragione per ritenere che il mio ascensore sia in moto assoluto. Voglio ammettere che il mio SC rigidamente collegato all'ascensore non sia realmente inerziale, ma non credo che ciò abbia nessun rapporto con il moto assoluto. Il mio orologio, il mio fazzoletto e tutti gli altri corpi cadono perché l'ascensore si trova in un campo gravitazionale. Riscontro esattamente lo stesso genere di movimenti che l'uomo nota sulla Terra. Egli li spiega molto semplicemente mediante un campo gravitazionale e ciò è vero anche per me.

Entrambe le descrizioni, tanto quella dell'osservatore esterno come quella dell'osservatore interno, sono del tutto logiche, e non c'è modo di decidere quale di esse sia la vera. Possiamo indifferentemente ammettere l'una o l'altra come spiegazione dei fenomeni che si producono nell'ascensore: e cioè tanto il moto non uniforme e l'assenza di un campo di gravitazione secondo l'osservatore esterno, quanto il riposo e la presenza di un campo di gravitazione secondo l'osservatore interno.

Si noti però che sebbene l'osservatore esterno abbia motivi di supporre che l'ascensore si trova in moto non uniforme «assoluto», non può considerarsi come tale un moto la cui eliminazione è possibile sostituendogli l'azione di un campo gravitazionale.

C'è forse un mezzo di uscire dall'ambiguità delle due differenti spiegazioni e di decidere in favore dell'una o dell'altra. Supponiamo che un raggio luminoso penetri orizzontalmente nell'ascensore attraverso un'apertura laterale, colpendo, dopo un brevissimo intervallo di tempo, la parete opposta e sentiamo quali siano le previsioni dei due osservatori circa la traiettoria del raggio luminoso.

L'*osservatore esterno*, il quale crede che l'ascensore effettui un moto accelerato, argomenterà come segue: il raggio luminoso penetra orizzontalmente attraverso l'apertura e si muove in linea retta, con velocità costante, verso la parete opposta. Ma la cabina è in moto verso l'alto e cambia di posizione mentre il raggio si muove verso la parete. Pertanto il raggio colpirà un punto che non è esattamente opposto al punto d'entrata, bensì un poco al di sotto. La differenza sarà lievissima, ma ciò nondimeno sussisterà, cosicché la pro-



pagazione della luce relativamente all'ascensore non sarà rettilinea, bensì leggermente curva. La differenza è dovuta alla distanza percorsa dalla cabina nel tempo in cui il raggio ne attraversa l'interno.

L'*osservatore interno*, il quale crede nel campo gravitazionale agente su tutti gli oggetti del suo ascensore, direbbe: Non è che l'ascensore si trovi in moto accelerato; esso è sotto l'azione di un campo gravitazionale. Un raggio luminoso non ha peso e perciò non può venire influenzato dal campo gravitazionale. Se il raggio è lanciato in direzione orizzontale, esso colpirà la parete in un punto esattamente opposto a quello della sua entrata.

Da questa discussione sembra scaturire la possibilità di pronunciarsi fra i due punti di vista opposti, in quanto il fenomeno sarebbe diverso per i due osservatori. Sempre che le spiegazioni riportate non contengano nulla d'incoerente, l'intera nostra argomentazione

precedente non avrebbe più valore, giacché non saremmo più in grado di descrivere tutti i fenomeni in due modi ugualmente coerenti con e senza campo gravitazionale.

Fortunatamente, il ragionamento dell'osservatore interno è affetto da un grave errore, che salva la conclusione alla quale siamo pervenuti precedentemente. L'osservatore interno dice: «Un raggio luminoso non pesa, motivo per cui non può venir influenzato dal campo gravitazionale». Ma ciò non può essere vero! Un raggio luminoso trasporta energia e questa possiede massa. E ogni massa inerte subisce l'attrazione del campo gravitazionale, poiché massa inerte e massa pesante sono equivalenti. Un raggio di luce s'incurverà in un campo gravitazionale alla stessa stregua di un corpo lanciato orizzontalmente con velocità uguale a quella della luce. Se dunque l'osservatore interno avesse ragionato correttamente e se avesse tenuto conto dell'incurvamento dei raggi luminosi in un campo gravitazionale, sarebbe giunto alle stesse conclusioni dell'osservatore esterno.

Naturalmente il campo gravitazionale della Terra è troppo debole per poter dimostrare mediante un esperimento diretto l'incurvamento dei raggi luminosi. Ma le celebri esperienze eseguite durante le eclissi solari provano in modo concludente, benché indiretto, l'influenza del campo gravitazionale sulla traiettoria di un raggio luminoso.

Dai precedenti esempi si ricava che la speranza di poter costruire una fisica relativistica è ben fondata. È però necessario attaccare previamente il problema della gravitazione.

L'esempio dell'ascensore ci ha mostrato la coerenza delle due descrizioni. È indifferente ammettere o meno l'esistenza del moto non uniforme. Il moto assoluto, come nei nostri esempi, può venir sostituito da un campo gravitazionale. Non deve dunque esservi nulla di assoluto nel moto non uniforme, se il campo gravitazionale può eliminarlo integralmente.

I fantasmi «moto assoluto» e «SC inerziale assoluto» possono venir cacciati dalla fisica. La costruzione di una nuova fisica relativistica diventa così possibile. I nostri esperimenti ideali mostrano come il problema della relatività generale sia intimamente connesso con quello della gravitazione; essi mostrano altresì perché l'equivalenza della massa pesante e della massa inerte sia così essenziale agli effetti di tale connessione. È evidente che la soluzione del proble-

ma della gravitazione in base alla teoria della relatività deve differire da quella di Newton. Le leggi della gravitazione, come tutte le leggi della natura, devono venire formulate per tutti i possibili *SC*, mentre le leggi della meccanica classica, formulate da Newton, sono valide soltanto per *SC* inerziali.

## Geometria ed esperienza

L'esempio di cui stiamo per servirci è ancora più fantastico di quello dell'ascensore in caduta libera. Dobbiamo affrontare un nuovo problema: quello della connessione fra relatività generale e geometria. Cominceremo col descrivere un mondo nel quale abitano soltanto esseri bidimensionali e non più tridimensionali, come nel nostro mondo. I film ci hanno abituati a vedere esseri bidimensionali agire su schermi bidimensionali. Immaginiamo ora che quei fantasmi, vale a dire gli attori sullo schermo, esistano realmente, che abbiano la facoltà di pensare, che siano in grado di creare una scienza loro propria e che per essi lo schermo bidimensionale rappresenti lo spazio geometrico. Tali esseri sono incapaci di immaginare, in forma concreta, uno spazio a tre dimensioni, così come noi siamo incapaci di immaginare uno spazio a quattro dimensioni. Essi possono flettere e incurvare una linea retta, e sanno che cosa sia un cerchio, ma sono incapaci di costruire una sfera, poiché per fare ciò dovrebbero abbandonare il loro schermo a due dimensioni. In quanto a noi, siamo bensì capaci di torcere e curvare linee e superfici, ma non riusciamo a rappresentarci uno spazio tridimensionale torto e incurvato.

Vivendo, pensando e sperimentando i nostri fantasmi potrebbero eventualmente giungere a una completa conoscenza della geometria euclidea a due dimensioni. Potrebbero ad esempio provare che la somma dei tre angoli di un triangolo è di 180 gradi. Potrebbero costruire due cerchi concentrici, l'uno molto piccolo e l'altro grande e quindi trovare che il rapporto fra le due circonferenze è uguale al rapporto fra i due raggi, risultato anch'esso caratteristico della geometria euclidea. Se lo schermo si estendesse all'infinito i

nostri fantasmi constaterrebbero che camminando sempre dritti davanti a loro non tornerebbero mai più al loro punto di partenza.

Immaginiamo ora che intervenga un mutamento nelle condizioni di vita di questi esseri a due dimensioni. Supponiamo che qualcuno dal di fuori, vale a dire dalla «terza dimensione», tolga i nostri fantasmi dallo schermo e li trasferisca sulla superficie di una sfera di raggio immenso. Se i fantasmi fossero molto piccoli rispetto a tale superficie, se non disponessero di mezzi di comunicazione a distanza e se non potessero allontanarsi molto, essi non potrebbero accorgersi affatto del mutamento. La somma degli angoli dei piccoli triangoli sarebbe sempre uguale a due angoli retti. Per due piccoli cerchi concentrici il rapporto fra le circonferenze sarebbe sempre uguale a quello fra i raggi. Viaggiando in linea retta i nostri fantasmi non farebbero mai ritorno al punto di partenza.

Ma supponiamo che con l'andar del tempo, quei fantasmi progrediscano nelle loro cognizioni teoriche e tecniche, e che inventino dei mezzi di comunicazione con i quali possano percorrere rapidamente distanze molto grandi. In tal caso essi constaterrebbero che andando sempre dritto innanzi a loro finirebbero per tornare al punto di partenza. Beninteso, «diritto innanzi» significa in questo caso seguire uno dei cerchi massimi della sfera. Essi constaterrebbero anche che il rapporto fra le circonferenze di due cerchi concentrici non è uguale al rapporto fra i rispettivi raggi, ove l'uno di questi sia molto piccolo e l'altro molto grande.

Se lo spirito dei nostri fantasmi fosse conservatore, se la geometria euclidea fosse stata insegnata presso di loro durante generazioni, allorché non potevano viaggiare a grandi distanze, per cui tale geometria concordava con i fatti osservati, essi farebbero certamente di tutto per rimanerle fedeli, nonostante l'evidenza derivante dalle loro misurazioni. Essi cercherebbero probabilmente d'imputare alla fisica le discrepanze osservate. Potrebbero, ad esempio, sostenere che una causa fisica, quale le variazioni di temperatura, determinano una deformazione delle linee e pertanto un distacco dalla geometria euclidea. Ma presto o tardi scoprirebbero che c'è un modo molto più logico e convincente di spiegare i fatti. Potrebbero eventualmente giungere a capire che il loro è un mondo finito, nel quale sono vevoli principi geometrici diversi da quelli già imparati. Essi finirebbero per comprendere che malgrado la loro incapacità

di rappresentarselo, il loro mondo è bensì una superficie a due dimensioni ma sferica. I nostri fantasmi ricorrerebbero allora a nuovi principi geometrici che, pur differendo da quelli di Euclide, fossero suscettibili di formulazione altrettanto coerente e logica, nonché confacente al mondo bidimensionale. Alla nuova generazione, che avesse acquisito le cognizioni della geometria sferica, la vecchia geometria euclidea parrebbe più complicata e artificiosa, poiché essa non concorderebbe con i fatti osservati.

Torniamo ora agli esseri tridimensionali del nostro mondo.

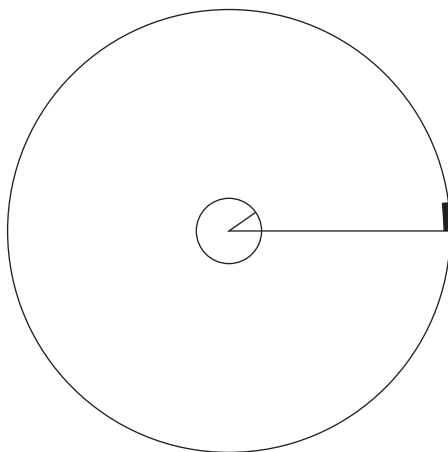
Che cosa significa l'affermazione che il nostro spazio tridimensionale possiede carattere euclideo? Significa che tutte le proposizioni logicamente provate dalla geometria euclidea possono venire confermate anche da esperienze reali. Sia mediante corpi rigidi, sia mediante raggi luminosi si possono infatti costruire oggetti corrispondenti a quelli immaginari della geometria euclidea. Lo spigolo di un regolo o un raggio luminoso corrispondono a una retta; la somma degli angoli di un triangolo costruito mediante asticelle rigide è di 180 gradi; il rapporto fra i raggi di due cerchi concentrici, costruiti con fili sottili e indeformabili, è uguale al rapporto fra le rispettive circonferenze. Interpretata in tal modo la geometria euclidea diventa un capitolo della fisica, se pur molto semplice.

Mettiamo che si accertino delle discrepanze: che, ad esempio, la somma degli angoli di un grande triangolo costruito con asticelle le quali, per buone ragioni, dovevano ritenersi rigide, non risulti più uguale a 180 gradi. Dato che siamo già familiarizzati con l'idea di rappresentare gli oggetti della geometria euclidea in modo concreto, ossia mediante corpi rigidi, saremo probabilmente indotti a ritenere che qualche forza fisica sia la causa di tale inatteso e cattivo comportamento delle nostre asticelle. Cercheremo allora di determinare la natura di tale forza, nonché la sua influenza su altri fenomeni. Pur di salvare la geometria euclidea, tenderemo ad accusare gli oggetti di non essere veramente rigidi, e pertanto di non corrispondere esattamente a quelli della geometria. Faremo di tutto per trovare corpi migliori, più atti a comportarsi come esige la geometria euclidea. Se, ciò nonostante, non riuscissimo a combinare geometria euclidea e fisica in modo da ottenere un'immagine semplice e coerente, ci vedremmo costretti ad abbandonare l'idea che il nostro spazio è euclideo, e a cercare di crearci una immagine

più conforme alla realtà, ricorrendo a supposizioni più generali sul carattere geometrico del nostro spazio.

La necessità di fare ciò può venire illustrata con un esperimento ideale che mostra come non sia possibile fondare una fisica realmente relativistica sulla geometria euclidea. Gli argomenti cui ricorreremo metteranno a profitto i risultati già acquisiti concernenti gli SC inerziali e la teoria della relatività speciale.

Immaginiamo un grande disco sul quale siano tracciati due cerchi concentrici, uno dei quali molto piccolo e l'altro molto grande e il cui centro comune coincida con il centro del disco. Un osservatore si trova sul disco che è animato da un rapido moto di rotazione rispetto a un osservatore esterno. Supporremo che l'SC di quest'ultimo sia un SC inerziale, e che l'osservatore esterno vi tracci due cerchi delle stesse dimensioni di quelli disegnati sul disco in rotazione e coincidenti con essi. Trattandosi di un SC inerziale la geometria euclidea è valevole per l'SC dell'osservatore esterno, per cui egli troverà che il rapporto fra le circonferenze è uguale a quello fra i raggi. Ma come stanno le cose per l'osservatore sul disco in rotazione? Dal punto di vista sia della fisica classica, sia della teoria della relatività speciale, il suo SC è interdetto. Ma se ci proponiamo di trovare nuove forme per le leggi fisiche, valevoli per





qualsiasi *SC*, dobbiamo tenere nello stesso conto le misurazioni di entrambi gli osservatori. Beninteso, quello di essi che si trova sul disco in rotazione al misurare la lunghezza dei raggi e delle circonferenze dovrà adoperare il medesimo regolo di cui si serve l'osservatore esterno. Il «medesimo» significa realmente il medesimo regolo che l'osservatore esterno passa a quello sul disco, oppure l'uno di due regoli aventi la medesima lunghezza a riposo in uno stesso *SC*.

L'osservatore sul disco comincia col misurare raggio e circonferenza del cerchio piccolo. I risultati sono necessariamente gli stessi come per l'osservatore esterno. L'asse intorno al quale ruota il disco passa per il centro di questo, nella cui vicinanza le velocità di rotazione sono molto piccole. Se il cerchio è abbastanza piccolo, possiamo con tutta sicurezza applicare le leggi della meccanica classica e ignorare la relatività speciale. Ciò significa che il regolo possiede la stessa lunghezza tanto per l'osservatore esterno quanto per quello sul disco e che il risultato delle misurazioni sarà lo stesso per entrambi. Vediamo ora che cosa succede allorché l'osservatore sul disco misura il raggio del cerchio grande. Collocato sul raggio, il regolo si trova in moto rispetto all'osservatore esterno. Tuttavia il regolo non subisce contrazione e possiede la stessa lunghezza per entrambi gli osservatori, dato che la direzione del moto è perpendicolare al raggio. Pertanto tre misure, quelle cioè dei due raggi e della circonferenza piccola, sono le stesse per entrambi gli osservatori. Ma non è più così per la quarta misura! La lunghezza della circonferenza grande sarà diversa per i due osservatori. Il regolo collocato sulla circonferenza nella direzione del moto sembrerà contratto all'osservatore esterno in paragone con il proprio, a riposo. La velocità è molto superiore a quella del cerchio interno e questa contrazione va tenuta in conto. Cosicché, se applichiamo la teoria della relatività speciale, giungiamo alla conclusione che la circonferenza grande, misurata dai due osservatori, deve risultare di lunghezza diversa. E poiché una sola delle quattro lunghezze misurate dai due osservatori non è per essi la stessa, ne segue che per l'osservatore sul disco il rapporto fra i due raggi non può essere uguale al rapporto fra le due circonferenze, come lo è per l'osservatore esterno. Ciò significa che l'osservatore sul disco non può confermare la validità della geometria euclidea nel proprio *SC*.

Dopo essere pervenuto a questo risultato, l'osservatore sul disco potrebbe dichiarare di non voler prendere in considerazione *SC* nei quali la geometria euclidea non valga. Ma il crollo di quest'ultima è imputabile alla rotazione assoluta, al fatto cioè che il disco in rotazione è un *SC* «cattivo» e interdetto. Cosicché l'anzidetta dichiarazione equivale alla reiezione dell'idea direttrice della relatività generale. Per contro, ove si voglia rinnegare il moto assoluto e attenersi alle direttive della teoria della relatività generale, è indispensabile costruire la fisica sulla base di una geometria più generale di quella euclidea. Non c'è modo di sfuggire a questa conseguenza, se tutti gli *SC* devono essere ammissibili.

Le riforme introdotte dalla teoria della relatività generale non sono limitate allo spazio soltanto. Secondo la teoria della relatività speciale si avevano negli *SC* inerziali orologi sincronizzati, battenti lo stesso ritmo, vale a dire segnanti lo stesso tempo simultaneamente. Che cosa accade a un orologio in un *SC* non inerziale? L'esperimento ideale con il disco in rotazione ci sarà utile anche qui. L'osservatore esterno dispone nel suo *SC* inerziale di orologi perfetti, che camminano tutti con lo stesso ritmo e sono sincronizzati. L'osservatore sul disco prende due di questi orologi, collocandone uno sulla circonferenza piccola e l'altro sulla grande. L'orologio sulla circonferenza piccola non ha che una piccola velocità relativamente all'osservatore esterno. Possiamo perciò ammettere senza esitazione che il ritmo di questo orologio rimanga lo stesso di quello degli orologi esterni. Per contro, l'orologio collocato sulla circonferenza grande possiede velocità considerevole, per cui il suo ritmo cambia rispetto agli orologi dell'osservatore esterno e quindi anche rispetto all'orologio situato sulla circonferenza piccola. I due orologi in rotazione avranno dunque ritmi diversi, di modo che attendoci alle norme della teoria della relatività speciale potremo di nuovo constatare che nel nostro *SC* in rotazione non si possono adottare procedimenti simili a quelli applicabili in un *SC* inerziale.

Per mettere in maggior rilievo le conclusioni deducibili da questo esperimento ideale come anche da quelli precedentemente descritti, passeremo ancora una volta la parola ai due fisici, l'antiquato *A*, che ha fede nella fisica classica e il moderno *M*, che conosce la teoria della relatività generale. S'intende che *A* è anche

l'osservatore esterno situato in un *SC* inerziale, mentre *M* si trova sul disco in rotazione.

*A* Nel vostro *SC* la geometria euclidea non è valida. Ho seguito le misurazioni da voi effettuate e riconosco che il rapporto fra le due circonferenze non è, nel vostro *SC*, uguale al rapporto fra i due raggi. Ciò prova evidentemente che il vostro *SC* è un *SC* interdetto. In cambio, il mio *SC* è inerziale e posso applicarvi tranquillamente la geometria euclidea. Il vostro disco si trova in moto assoluto e dal punto di vista classico costituisce un *SC* interdetto nel quale le leggi della meccanica non valgono.

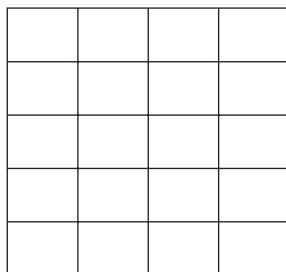
*M* Non voglio sentir parlare di moto assoluto. Il mio *SC* è altrettanto «buono», come il vostro. Ciò che io ho osservato è una rotazione rispetto al mio disco. Nessuno può vietarmi di riferire tutti i moti al mio disco.

*A* Ma non avete sentito una forza insolita tirarvi dal centro verso la periferia? Se il vostro disco non avesse ruotato rapidamente i fenomeni da voi osservati non si sarebbero certamente prodotti. Non avreste sentito la forza spingervi verso l'esterno, né avreste constatato che la geometria euclidea non è applicabile nel vostro *SC*. Non vi bastano forse questi fatti per convincervi che il vostro *SC* si trova in moto assoluto?

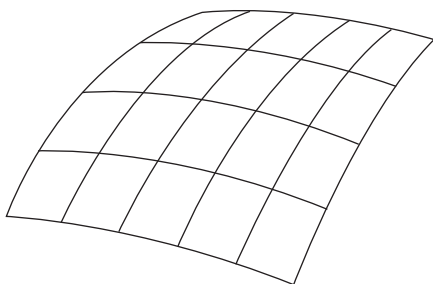
*M* Niente affatto. Ho osservato i due fatti da voi menzionati, ma ne rendo responsabile uno strano campo gravitazionale che agisce sul mio disco. Essendo diretto verso l'esterno del disco, esso deforma i miei regoli rigidi e modifica il ritmo dei miei orologi. Campo gravitazionale, geometria non euclidea e orologi aventi ritmi diversi sono per me fatti intimamente connessi. Adottando un *SC* qualsiasi debbo anche supporre l'esistenza di un campo gravitazionale appropriato, nonché l'influenza che esso esercita su regoli rigidi e orologi.

*A* Ma vi rendete conto delle difficoltà suscitate dalla vostra teoria della relatività generale? Vorrei spiegare chiaramente il mio punto di vista ricorrendo a un esempio facile, che non rientra nel dominio della fisica. Immaginate una città americana, ideale, dotata di strade parallele, intersecate da viali paralleli, perpendicolari alle prime. La distanza fra due strade o due viali è sempre la stessa, cosicché anche tutti i blocchi di case sono della medesima grandezza. In tal modo è facilissimo determinare la posizione di un blocco qual-

siasi. Ma è chiaro che una costruzione simile non sarebbe possibile senza la geometria euclidea. Non è possibile, ad esempio, coprire l'intera nostra Terra con un'unica grande città americana, ideale. Basta uno sguardo a un globo per convincersene. Ma non sarebbe neanche possibile coprire il vostro disco con una simile «città americana». Voi dite che i vostri regoli sono deformati dal campo gravitazionale. Il fatto che voi non possiate confermare il teorema di Euclide sull'uguaglianza dei rapporti fra i raggi e fra le circonferenze prova chiaramente che se voi tracciate strade e viali abbastanza lunghi finirete coll'incontrare delle difficoltà e per trovare che non è possibile coprire il vostro disco con una «città americana». La vostra geometria sul disco somiglia a quella su una superficie curva, sulla quale, se abbastanza grande, non è possibile tracciare strade e viali all'americana. Per ricorrere a un esempio di carattere eminentemente fisico, supponiamo una superficie riscaldata irregolarmente, le cui diverse parti abbiano temperature diverse. Potete costruirvi la figura «paralleloperpendicolare» descritta, servendovi di aste di ferro che si allungano con la temperatura? Sicuramente no. Il vostro campo gravitazionale fa al vostro tracciato lo stesso scherzo come il cambiamento di temperatura alle aste di ferro.



*M* Tutto ciò non mi spaventa. Il tracciamento delle strade e dei viali è necessario per determinare la posizione dei punti e l'orologio lo è per indicare la successione degli eventi. Ma non è necessario che la città sia di tipo americano; potrebbe altrettanto convenientemente somigliare a una vecchia città europea. Immaginate che la vostra città ideale sia costruita in materia plastica e poi deformata.



Potrò sempre contare i blocchi delle case e riconoscere le strade e i viali, benché non siano più diritti ed equidistanti. Parimenti, longitudine e latitudine indicano sulla nostra Terra le posizioni dei punti, senza bisogno di una «città americana».

A Scorgo tuttavia una difficoltà. Voi siete costretto a impiegare la struttura di una «città all'europea». Vi concedo che anche così potete ordinare punti ed eventi, ma una struttura simile turberà tutte le misure di distanza. La vostra costruzione non vi darà le *proprietà metriche* dello spazio come avviene con la mia. In una «città all'americana» so che per percorrere la distanza di dieci blocchi di case devo coprire due volte la distanza di cinque blocchi. Sapendo che tutti i blocchi di case sono uguali posso determinare direttamente le distanze.

M Questo è vero. Nella mia «città all'europea» non posso misurare le distanze direttamente contando i blocchi di case deformati. Devo sapere qualcosa di più: devo conoscere le proprietà geometriche della mia superficie. Tutti sanno che la longitudine da 0 a 10 gradi sull'Equatore non è la stessa come da 0 a 10 gradi nei paraggi del Polo Nord. Ma tutti i navigatori sanno come procedere per determinare due simili distanze sulla superficie terrestre, poiché ne conoscono le proprietà geometriche. Essi lo fanno, sia ricorrendo al calcolo basato sulla trigonometria sferica, sia navigando lungo le due distanze con la stessa velocità. Nel vostro caso il problema è banale perché tutte le strade e tutti i viali sono alla stessa distanza gli uni dagli altri. Il problema è più complesso quando si tratta della superficie terrestre; i due meridiani di 0 e di 10 gradi s'incontrano ai Poli, e possiedono la massima distanza l'uno dall'al-

tro all'Equatore. Allo stesso modo nella mia «città europea» devo conoscere qualche cosa più di voi, nella vostra «città americana». Posso procurarmi questa cognizione complementare studiando le proprietà geometriche del mio continuo, in ogni singolo caso.

A Ma tutto ciò mostra in quale situazione imbarazzante e difficile ci si viene a trovare allorché si abbandona la struttura semplice della geometria euclidea per ricorrere alla complessa armatura di cui siete costretto a servirvi. È realmente necessario?

M Certamente, ove si voglia applicare la nostra fisica a un SC arbitrario, senza più curarsi del misterioso SC inerziale. Riconosco che il mio apparato matematico è più complicato del vostro, ma le mie supposizioni fisiche sono più semplici e più naturali.

La discussione si è limitata al continuo bidimensionale. Nella teoria della relatività generale le cose si complicano di molto, poiché l'oggetto della controversia non è più il continuo bidimensionale, bensì il continuo a quattro dimensioni. Le idee sono però le stesse di quelle delineate per il continuo a due dimensioni. Nella teoria della relatività generale non possiamo servirci né della struttura a aste parallele e normali le une alle altre, né di orologi sincronizzati, come abbiamo fatto nella teoria della relatività speciale. In un SC arbitrario non possiamo determinare il punto e l'istante in cui un evento si produce mediante aste rigide e orologi ritmici sincronizzati, come nell'SC inerziale della relatività speciale. Possiamo ordinare gli eventi mediante i nostri regoli non euclidei e i nostri orologi aventi ritmo diverso. Ma le misure reali, mediante l'impiego di regoli rigidi e di orologi perfettamente ritmici e sincronizzati, possono effettuarsi soltanto nell'SC inerziale circoscritto. In tal caso la teoria della relatività speciale è bensì valida, ma il nostro «buon» SC è circoscritto, poiché il suo carattere inerziale è limitato nello spazio e nel tempo. I risultati delle misure effettuate nell'SC inerziale circoscritto possono prevedersi anche stando nel nostro SC arbitrario. Ma a tal fine occorre conoscere i caratteri geometrici del nostro continuo spazio-temporale.

I nostri esperimenti ideali non fanno che accennare al carattere generale della nuova fisica relativista. Essi ci mostrano che il problema fondamentale è quello della gravitazione. Ci mostrano anche che la teoria della relatività generale conduce a una ulteriore generalizzazione dei concetti di spazio e di tempo.

## La relatività generale e la sua verifica

La teoria della relatività generale cerca di formulare leggi fisiche valevoli per tutti gli SC e il suo problema fondamentale è quello della gravitazione. Per la prima volta, dall'epoca di Newton in poi, con la relatività generale si compie un serio sforzo ai fini di formulare diversamente la legge della gravitazione. Ma ciò è veramente necessario? Nei capitoli precedenti abbiamo constatato i successi della teoria di Newton e il grande sviluppo raggiunto dall'astronomia grazie alla sua legge di gravitazione. Alla base di tutti i calcoli astronomici sta tuttora la legge di Newton. Abbiamo tuttavia già fatto conoscenza di alcune obiezioni sollevate contro di essa. La legge di Newton non è valida che negli SC inerziali della fisica classica, vale a dire in SC nei quali, per definizione, le leggi della meccanica devono essere valevoli. La forza che si esercita fra due masse deve dipendere dalla distanza che le separa l'una dall'altra, e la connessione fra forza e distanza deve essere invariante rispetto alla trasformazione classica. Ma questa legge non quadra con la relatività speciale, secondo cui la distanza non è più invariante rispetto alla trasformazione di Lorentz. Potremmo tentare, come abbiamo fatto con tanto successo per le leggi del moto, di generalizzare la legge di gravitazione allo scopo di adeguarla alla teoria della relatività speciale. In altri termini potremmo cercare di formularla in modo che risulti invariante rispetto alla trasformazione lorentziana e non più rispetto alla trasformazione classica. Ma la legge di gravitazione newtoniana resisterebbe tenacemente a tutti i nostri tentativi per semplificarla e adattarla al quadro della relatività speciale. E quand'anche riuscissimo, dovremmo pur sempre fare un ulteriore passo avanti: il passo cioè che dall'SC inerziale della relatività speciale conduce al-

l' $SC$  arbitrario della relatività generale. D'altro canto le esperienze ideali sull'ascensore in caduta libera mostrano chiaramente che non c'è nessuna probabilità di riuscire a formulare la teoria della relatività generale prima di aver risolto il problema della gravitazione. Questa discussione fa vedere perché la soluzione del problema della gravitazione non può essere la medesima nella fisica classica e nella teoria della relatività generale.

Abbiamo già cercato di mostrare la strada che conduce alla teoria della relatività generale, nonché le ragioni che ci costringono ancora una volta a mutare le nostre antiche vedute. Senza dilungarci sulla sua struttura formale, caratterizzeremo quei tratti della nuova teoria gravitazionale che più la differenziano dall'antica. Dopo tutto ciò che è stato detto in precedenza, non dovrebbe riuscire difficile afferrare la natura di tali differenze.

1) Le equazioni della gravitazione secondo la teoria della relatività generale possono applicarsi a qualsiasi  $SC$ . Scegliere in un caso speciale un particolare  $SC$  è una mera questione di comodità. Teoricamente tutti gli  $SC$  sono ammissibili. Ove si prescinda dalla gravitazione, si ritorna automaticamente all' $SC$  inerziale della relatività speciale.

2) La legge di gravitazione di Newton connette il moto di un corpo qui e ora con l'azione di un corpo esercitantesi nello stesso preciso istante a grande distanza. Questa legge ha fornito il modello per l'intera concezione meccanicistica. Ma questa è crollata. Con le equazioni di Maxwell è stato creato un nuovo modello per le leggi della natura. Tali equazioni sono strutturali. Esse connettono gli eventi che si verificano ora e qui a eventi che avranno luogo subito dopo nell'immediata vicinanza. Esse costituiscono leggi descriventi le variazioni del campo elettromagnetico. Le nostre nuove equazioni della gravitazione sono anch'esse leggi strutturali, descriventi le variazioni del campo gravitazionale. Schematicamente si può dire: il passaggio dalla legge di gravitazione di Newton alla relatività generale è fino a un certo punto analogo al passaggio dalla teoria dei fluidi elettrici e rispettiva legge di Coulomb alla teoria di Maxwell.

3) Il nostro mondo non è euclideo. La natura geometrica del nostro mondo è determinata dalle masse e dalle loro velocità. Le equazioni della gravitazione, rispondenti alla teoria della relatività



generale, tendono a mettere in luce le proprietà geometriche del nostro mondo.

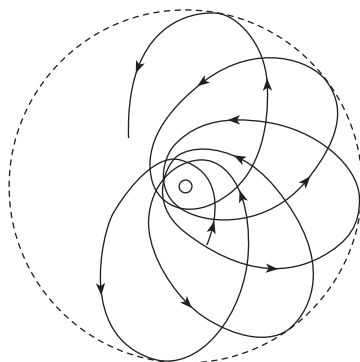
Ammettiamo per il momento di essere riusciti ad attuare rigorosamente il programma della teoria della relatività generale. Con la speculazione corriamo il rischio di allontanarci troppo dalla realtà? È possibile gettare un ponte fra la nuova teoria e l'osservazione? Sappiamo quanto siano soddisfacenti le spiegazioni delle osservazioni astronomiche fornite dall'antica teoria. Qualsiasi speculazione va sottoposta alla prova dell'esperienza e tutte le conseguenze, per seducenti che siano, vanno ripudiate se non concordano con i fatti. La nuova teoria della gravitazione resiste forse alla prova dell'esperienza? A tale quesito si può rispondere con una sola frase: L'antica teoria è un caso limite particolare della nuova. Allorché le forze della gravitazione sono relativamente deboli si constata che l'antica legge di Newton costituisce una buona approssimazione delle nuove leggi della gravitazione. Tutte le osservazioni a sostegno della teoria classica stanno anche a sostegno della teoria della relatività generale. Ritroviamo l'antica teoria dal punto di vista più elevato della nuova.

Quand'anche non si potesse citare nessuna osservazione in favore della nuova teoria, quand'anche la spiegazione che essa ci offre fosse semplicemente altrettanto buona di quella offertaci dall'antica, potendo scegliere liberamente dovremmo optare per la nuova. Le equazioni di quest'ultima dal punto di vista formale sono più complicate, ma le supposizioni che stanno alla loro base, dal punto di vista dei principi fondamentali, sono più semplici. I due ingombranti fantasmi, lo spazio assoluto e il sistema inerziale, scompaiono. L'equivalenza fra massa pesante e massa inerte non è più trascurata. Non è più necessario fare supposizioni di sorta circa le forze di gravitazione e la loro dipendenza dalla distanza. Le nuove equazioni della gravitazione ricevono la forma di leggi strutturali, la forma cioè richiesta per tutte le leggi fisiche, dopo le grandi conquiste della teoria del campo.

Alcune nuove deduzioni, non ricavabili dalla legge newtoniana, possono trarsi dalle nuove leggi gravitazionali. Una di tali deduzioni, della quale abbiamo già parlato, è l'incurvamento dei raggi luminosi in un campo gravitazionale. Vogliamo ora menzionare due nuove conseguenze.

Se le antiche leggi scendono dalle nuove allorquando le forze di gravitazione sono deboli, sarà soltanto in presenza di forze di gravitazione relativamente intense che le divergenze dalla legge di Newton potranno prodursi. Scegliamo come esempio il nostro sistema solare. I pianeti, compresa la nostra Terra, descrivono traiettorie ellittiche intorno al Sole. Il pianeta più vicino al Sole è Mercurio. Per effetto della minor distanza, l'attrazione fra il Sole e Mercurio è più forte di quella fra il Sole e qualunque altro dei pianeti. Se c'è qualche speranza di poter constatare la divergenza dalla legge newtoniana è su Mercurio che bisogna contare. Dalla teoria classica segue che la traiettoria descritta da questo pianeta è dello stesso genere di quella degli altri pianeti, con la sola differenza che essa è più vicina al Sole. Secondo la teoria della relatività generale, invece, il moto di Mercurio deve essere leggermente diverso. Questo pianeta non soltanto deve girare intorno al Sole, ma l'ellisse che esso descrive deve a sua volta girare lentamente rispetto all'SC collegato al Sole. Questa rotazione della ellisse sta a esprimere il nuovo effetto derivante dalla teoria della relatività generale, che ne prevede anche la grandezza. L'ellisse di Mercurio compirebbe una rotazione completa nel termine di tre milioni d'anni. Di qui vediamo quanto lieve sia l'effetto e come non vi sia speranza di poterlo constatare presso i pianeti più distanti dal Sole.

La deviazione del pianeta Mercurio dalla ellisse era conosciuta prima che la teoria della relatività generale venisse formulata, ma rimaneva inspiegabile. La teoria s'è sviluppata senza por mente a



questo problema speciale. Ed è soltanto più tardi che dalle nuove equazioni della gravitazione si sono tratte conclusioni circa la rotazione della ellisse descritta da un pianeta intorno al Sole. Nel caso di Mercurio la relatività ha spiegato con pieno successo la divergenza dalla legge di Newton.

Ma c'è anche un'altra conclusione che è stata dedotta dalla teoria della relatività generale e poi messa a confronto con l'esperienza. Abbiamo già visto che un orologio situato sulla circonferenza grande di un disco in rotazione possiede ritmo diverso dall'orologio situato sulla circonferenza piccola. Dalla teoria segue allo stesso modo che un orologio situato sul Sole avrebbe un ritmo diverso da un orologio d'identica costruzione situato sulla Terra, e ciò per il fatto che l'influenza del campo gravitazionale è più forte sul Sole che sulla Terra.

Abbiamo già detto (p. 103) che il sodio allo stato incandescente emette luce gialla omogenea di una determinata lunghezza d'onda. Con questa radiazione l'atomo rivela un proprio ritmo. L'atomo rappresenta, per così dire, un orologio il cui ritmo è la lunghezza d'onda emessa. Secondo la teoria della relatività generale, la lunghezza d'onda della radiazione emessa dall'atomo di sodio situato sul Sole sarebbe leggermente più grande.

Il compito di porre alla prova dell'osservazione le conseguenze della teoria della relatività generale è complesso e tutt'altro che risolto. Dato che qui ci occupiamo delle idee principali, non abbiamo intenzione di esaminare questo soggetto più a fondo; ci contenteremo di dire che, finora, l'esperienza sembra confermare le conclusioni tratte dalla teoria della relatività generale.

## Campo e materia

Abbiamo visto come e perché l'interpretazione meccanicistica sia fallita. Era impossibile spiegare tutti i fenomeni ammettendo che forze semplici agissero fra particelle inalterabili. Il primo tentativo di superare il criterio meccanicistico, introducendo i concetti di campo, si mostrò assai fertile, specie nell'ambito dei fenomeni elettromagnetici. Vennero formulate le leggi strutturali del campo elettromagnetico, le quali ricollegano eventi molto prossimi gli uni agli altri, nello spazio e nel tempo. Queste leggi rientrano nello schema della teoria della relatività speciale poiché sono invarianti rispetto alla trasformazione di Lorentz. Posteriormente la teoria della relatività generale formulò le leggi gravitazionali, che sono anch'esse leggi strutturali, descriventi il campo gravitazionale fra particelle materiali. Fu poi facile generalizzare le leggi di Maxwell, in modo che potessero applicarsi a qualsiasi SC alla stessa stregua delle leggi gravitazionali, formulate dalla teoria della relatività generale.

Ci troviamo così di fronte a due realtà: *materia* e *campo*. Indubbiamente oggi non possiamo più ammettere che l'intero edificio della fisica riposi esclusivamente sul concetto di materia, come ritenevano i fisici al principio del XIX secolo. Per ora dobbiamo accogliere entrambi i concetti e domandarci se possiamo rappresentare la materia e il campo come due realtà differenti e distinguibili. Considerando una particella di materia potremmo ingenuamente immaginarci di essere in grado di delimitare una superficie definita della particella, al di là della quale la particella stessa cessa di esistere e appare il suo campo gravitazionale. In una simile rappresentazione la regione nella quale le leggi valide sono quelle del campo è

nettamente separata dalla regione occupata dalla materia. Ma quali sono i criteri fisici che distinguono la materia dal campo? Prima di far conoscenza con la teoria della relatività avremmo potuto tentare di rispondere a questo quesito nei termini seguenti: la materia possiede massa, non così il campo; la materia rappresenta massa mentre il campo rappresenta energia. Ma grazie alle nostre nuove cognizioni sappiamo già che tale risposta è inadeguata. La teoria della relatività ci insegna infatti che la materia rappresenta grandi riserve di energia e che l'energia rappresenta materia. Non possiamo dunque procedere a una distinzione qualitativa fra materia e campo, in quanto la distinzione fra massa ed energia non è di ordine qualitativo. Di gran lunga la maggior parte dell'energia è concentrata nella materia; tuttavia il campo che circonda la particella rappresenta anch'esso dell'energia, sebbene in misura incomparabilmente inferiore. Potremmo perciò dire: si ha materia ove la concentrazione dell'energia è grande; si ha campo ove la concentrazione dell'energia è debole. Ma se è così, allora la differenza fra materia e campo appare d'ordine quantitativo, anziché qualitativo. Non ha senso attribuire alla materia e al campo qualità nettamente diverse. Non possiamo figurarci una superficie ben delimitata, che separi distintamente campo e materia.

La stessa difficoltà si presenta nei riguardi della carica elettrica e del suo campo. Non sembra dunque possibile stabilire un semplice criterio qualitativo, per distinguere sia fra materia e campo, sia fra carica e campo.

Le nostre leggi strutturali, vale a dire tanto le leggi di Maxwell quanto le nuove leggi gravitazionali, non sono più vevoli per grandi concentrazioni di energia, e cioè là dove si trovano le sorgenti del campo, siano esse costituite da cariche elettriche o da materia. Ma non potremmo in tal caso modificare le nostre equazioni di modo che risultino valide ovunque, e cioè anche nelle regioni di enorme concentrazione dell'energia?

È certamente impossibile edificare la fisica sulla base del solo concetto di materia. D'altro lato, una volta riconosciuta l'equivalenza fra massa ed energia la divisione fra materia e campo appare artificiosa e non chiaramente definita. Non potremmo allora rinunciare al concetto di materia ed edificare una fisica del puro campo? Ciò che fa impressione sui nostri sensi come materia è in realtà una

grande concentrazione di energia in uno spazio relativamente limitato. Sembra quindi lecito assimilare la materia a regioni spaziali nelle quali il campo è estremamente forte. In tal modo potremmo crearci un nuovo sfondo filosofico, il cui obiettivo finale sarebbe la spiegazione di tutti gli eventi naturali mediante le leggi strutturali, ovunque e sempre valide. Da tale punto di vista, un sasso lanciato in aria è un campo variabile nel quale gli stati di maggior intensità del campo attraversano lo spazio con la velocità del sasso stesso. Nella nostra nuova fisica non vi sarebbe allora più posto per il binomio campo e materia; non rimarrebbe che una sola realtà: il campo. Questa nuova veduta è suggerita dalle grandi conquiste della fisica del campo, nonché dai successi registrati sia con la formulazione delle leggi dell'elettricità del magnetismo e della gravitazione sotto forma di leggi strutturali sia con il riconoscimento dell'equivalenza fra massa ed energia.

Per tutte queste considerazioni, come abbiamo già detto, il nostro problema finale sembra dover consistere nella modificazione delle leggi del campo, in modo tale che non cessino di essere valide nelle regioni di grandissima concentrazione dell'energia.

Ma finora non siamo ancora riusciti a realizzare questo programma in forma convincente e coerente. Decidere se ciò sia o no possibile appartiene al futuro. Per ora, in tutte le nostre concezioni teoriche, dobbiamo continuare ad ammettere due realtà: campo e materia.

Frattanto altri quesiti fondamentali attendono ancora una risposta. Sappiamo ormai che tutta la materia è costituita soltanto da alcune poche specie di particelle. Ma in qual modo queste particelle elementari concorrono alla costruzione delle varie forme che assume la materia? Quali sono le interazioni fra queste particelle e il campo? Nel cercare una risposta a questi problemi, nuove idee sono state introdotte nella fisica, le idee della *teoria dei quanti*.

## Riassumiamo

Un nuovo concetto – l’invenzione più importante dal tempo di Newton in poi – s’introduce nella fisica e cioè il concetto di campo. Occorreva una potente immaginazione scientifica per discernere che nella descrizione dei fenomeni elettrici non sono né le cariche né le particelle che costituiscono l’essenziale, bensì lo spazio interposto fra cariche e particelle.

Il concetto di campo si dimostra fertilissimo e conduce alla formulazione delle equazioni di Maxwell, descriventi la struttura del campo elettromagnetico e governanti non soltanto i fenomeni elettrici ma anche quelli ottici.

La teoria della relatività scaturisce dai problemi del campo. Le contraddizioni e le incoerenze delle antiche teorie ci costringono ad attribuire nuove proprietà al continuo spazio-temporale, teatro di tutti gli avvenimenti del nostro mondo fisico.

La teoria della relatività prende corpo in due tempi. Il primo di questi conduce alla cosiddetta teoria della relatività speciale che si applica soltanto a sistemi di coordinate inerziali, a sistemi cioè per i quali sono valide le leggi d’inerzia formulate da Newton. La teoria della relatività speciale si basa sopra due presupposti fondamentali e cioè: le leggi fisiche sono le stesse per tutti i sistemi di coordinate i cui moti relativi sono uniformi; la velocità della luce conserva sempre lo stesso valore. Partendo da queste supposizioni, confermate sperimentalmente oltre ogni dubbio, si deducono le proprietà dei regoli di misura e degli orologi in movimento, nonché le modificazioni in lunghezza e rispettivamente in ritmo che essi subiscono con il variare della velocità. La teoria della relatività modifica le leggi della meccanica. Le antiche leggi non valgono più quando la velo-

cità di una particella in moto si avvicina a quella della luce. Le nuove leggi per un corpo in movimento formulate dalla teoria della relatività sono pienamente confermate dall'esperimento. Una conseguenza ulteriore della teoria della relatività speciale è la rivelazione dell'intimo legame fra massa ed energia. La massa è energia, e l'energia possiede massa. Le due leggi della conservazione della massa e dell'energia vengono fuse dalla teoria della relatività in una sola: la legge di conservazione della massa-energia.

La teoria della relatività generale fornisce un'analisi ancor più profonda del continuo spazio-temporale. La validità della teoria non si limita più ai soli sistemi di coordinate inerziali. La teoria aborda il problema della gravitazione e formula nuove leggi strutturali del campo gravitazionale. Essa conduce ad analizzare la parte spettante alla geometria nella descrizione del mondo fisico. Considera l'uguaglianza della massa inerte e della massa pesante quale fatto essenziale e non meramente accidentale come fa la meccanica classica. Le conseguenze fenomenologiche della teoria della relatività generale differiscono di poco da quelle della meccanica classica. Esse trovano conferma sperimentale ogni qual volta un confronto è possibile. Ma la saldezza della teoria risiede anzitutto nella sua intrinseca coerenza e nella semplicità delle sue supposizioni fondamentali.

La teoria della relatività accentua l'importanza che nel dominio della fisica spetta al concetto di campo. Finora però non siamo riusciti a formulare una fisica basata sul puro campo. Per il momento dobbiamo ancora ammettere la coesistenza del binomio campo e materia.



*Parte quarta*

Quanti



## Continuità, discontinuità

Una pianta di Roma e dintorni è aperta davanti a noi. Ci domandiamo: quali sono i punti che possiamo raggiungere con il treno? Dopo aver consultato un orario ferroviario potremo marcare sulla nostra carta i diversi punti corrispondenti alle fermate dei treni. Se poi ci domandiamo quali punti si possono raggiungere con l'automobile possiamo tracciare sulla pianta delle linee lungo le varie strade che si staccano dal centro della città. Qualsiasi punto di tali linee può essere raggiunto con l'automobile. In entrambi i casi abbiamo delle serie di punti, ma nel primo i vari punti sono separati gli uni dagli altri dalle distanze più o meno considerevoli fra le stazioni ferroviarie, mentre nel secondo caso i punti si susseguono senza interruzione lungo i tracciati delle strade. Possiamo inoltre domandarci quali siano le distanze dei punti in questione dal centro o da qualsiasi altro luogo della città. Nel primo caso a ognuno dei punti corrisponde un certo numero. Tali numeri variano irregolarmente e saltuariamente, ma sempre in misura finita. Diremo dunque che le distanze fra il centro della città e le località raggiungibili col treno variano sempre in modo *discontinuo*. Per contro, i punti raggiungibili con l'automobile possono variare in che misura si vuole, per piccola che sia; possono cioè variare in modo *continuo*. Insomma, le distanze possono differenziarsi in misura arbitrariamente piccola usando l'automobile; non così se facciamo uso del treno.

La produzione di una miniera carbonifera può variare in modo continuo. La quantità del carbone estratto può essere ridotta o accresciuta in misura arbitrariamente piccola. Ma il numero dei minatori impiegati può variare soltanto in modo discontinuo. Non avrebbe senso dire: «da ieri il numero degli operai è aumentato di 3,783».

Una somma di denaro può variare soltanto saltuariamente, vale a dire in modo discontinuo. In Italia la più piccola unità monetaria legale, che potremmo anche designare come il «quanto elementare» della valuta nazionale è il centesimo. In Inghilterra il «quanto elementare» monetario è il *farthing* (un quarto di denaro) che nominalmente vale circa dieci volte più del quanto monetario italiano. Qui abbiamo l'esempio di due quanti elementari i cui valori sono suscettibili di comparazione. Il rapporto di tali valori ha un significato preciso, poiché uno di essi vale un certo numero di volte più dell'altro.

È dunque lecito asserire: alcune quantità possono variare in modo continuo mentre altre variano soltanto in modo discontinuo o saltuario, a porzioni piccolissime non ulteriormente riducibili. Queste porzioni indivisibili si chiamano *quanti elementari* della specifica quantità cui si riferiscono.

Possiamo pesare notevoli quantità di sabbia e considerarne la massa come continua, benché la sua struttura granulare sia evidente. Ma se la sabbia dovesse diventare preziosa e venisse perciò pesata con bilance molto sensibili, non potremmo fare a meno di tener conto che la sua massa varia sempre in ragione del multiplo di un granello. La massa di questa unità granulare diventerebbe il nostro quanto elementare. Questo esempio mostra come aumentando la precisione delle misure si possa giungere a verificare il carattere discontinuo di una quantità precedentemente ritenuta continua.

Se dovessimo caratterizzare in una frase l'idea fondamentale della teoria quantistica diremmo: *deve ammettersi che alcune quantità fisiche finora ritenute come continue si compongono di quanti elementari.*

I fatti pertinenti alla teoria quantistica sono numerosissimi e coprono un campo assai vasto. La rivelazione di tali fatti è dovuta al grande raffinamento raggiunto dalla tecnica sperimentale moderna. Non potendo qui né mostrare, né descrivere neanche gli esperimenti più fondamentali dovremo limitarci a citarne dogmaticamente i risultati. Ricordiamo che il nostro obiettivo è soltanto quello di spiegare idee e criteri basilari.

## Quanti elementari di materia ed elettricità

Secondo la rappresentazione della materia rispondente alla teoria cinetica tutte le sostanze elementari si compongono di molecole. Scegliamo il caso più semplice: quello dell'elemento più leggero e cioè l'idrogeno. A p. 70 abbiamo visto come lo studio del movimento browniano abbia condotto alla determinazione della massa di una molecola d'idrogeno. Il suo valore è di

0,00000000000000000000000033 g.

Ciò significa che la massa è discontinua. La massa di un quantitativo d'idrogeno non può variare che saltuariamente, in ragione di un numero intero di porzioni minuscole, ognuna delle quali corrisponde alla massa di una molecola d'idrogeno. Tuttavia i processi chimici insegnano che la molecola d'idrogeno si può spezzare in due parti uguali, ovvero che la molecola d'idrogeno si compone di due atomi. Nei processi chimici è l'atomo e non la molecola che rappresenta un quanto elementare. La divisione per due del numero di cui sopra ci dà la massa di un atomo d'idrogeno. Questa è di circa

0,00000000000000000000000017 g.

La massa è dunque una quantità discontinua. È però evidente che non c'è da preoccuparsene nelle pesate. Le bilance più sensibili sono ben lontane dal raggiungere il grado di precisione necessario per constatare la discontinuità al variare della massa.

Torniamo ora su un fatto a noi già noto. Un filo metallico è allacciato alla sorgente di una corrente. Questa circola nel filo, dal potenziale più alto al più basso. Ricordiamo che fu possibile spiegare molti fatti sperimentali con la semplice teoria dei fluidi elettrici cir-

colanti nel filo. Ricordiamo inoltre (pp. 82-83) che decidere se sia il fluido positivo che circola dal potenziale più alto al più basso, o viceversa il fluido negativo che circola dal potenziale più basso al più alto, obbedì soltanto a una convenzione. Anche senza tener conto delle nuove cognizioni derivanti dai concetti di campo e attenendoci alle ipotesi sempliciste dei fluidi rimangono tuttora alcuni punti da chiarire. Come la parola «fluido» sta a denotare, l'elettricità venne da prima ritenuta una quantità continua. Secondo gli antichi criteri il valore della carica elettrica doveva potersi modificare in misura arbitrariamente piccola. Non pareva necessario di dover ricorrere alla supposizione di quanti elementari di elettricità. Ma le conquiste della teoria cinetica della materia condussero a un nuovo quesito e cioè: esistono quanti elementari dei fluidi elettrici? Un'altra domanda cui dobbiamo ancora rispondere è la seguente: la corrente consiste nella circolazione del fluido positivo, di quello negativo o di entrambi?

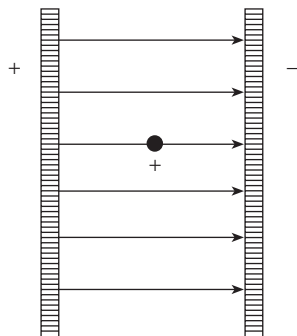
L'idea su cui si basano tutti gli esperimenti intesi a risolvere questi problemi è quella di svellere il fluido elettrico dal filo, di proiettarlo nello spazio vuoto e di dissociarlo completamente dalla materia, per poi investigarne la proprietà, che in tali condizioni dovrebbero manifestarsi con la maggiore evidenza.

Molti esperimenti di questo tipo vennero intrapresi alla fine del XIX secolo. Prima di spiegare le modalità di uno almeno di essi, ne indicheremo i risultati. Il fluido elettrico circolante nel filo è il negativo ed è perciò diretto dal potenziale più basso al più alto. Se ciò si fosse capito fin dal principio, quando la teoria dei fluidi elettrici cominciò a essere costruita, si sarebbero certamente scambiate le parole, chiamando positiva l'elettricità della bacchetta di gomma elastica e negativa quella della bacchetta di vetro.

In tal caso sarebbe stato più conveniente considerare il fluido circolante come positivo. Ma poiché allora si indovinò male, dobbiamo rassegnarci a sopportarne le conseguenze. Viene adesso la questione di sapere se la struttura di questo fluido negativo sia «granulare», vale a dire se esso sia o no composto di quanti elettrici. Anche qui numerosi esperimenti fra loro indipendenti dimostrano che non può sussistere dubbio alcuno circa l'esistenza di un quanto elementare di questa elettricità negativa. Il fluido elettrico negativo si compone di granuli, così come alcune spiagge consistono di

granelli di sabbia o certe case sono costruite in mattoni. Questo risultato venne enunciato con tutta chiarezza da J. J. Thomson, circa quarant'anni fa. I quanti elementari di elettricità negativa furono denominati *elettroni*. Ogni carica elettrica negativa si compone di una moltitudine di cariche elementari, rappresentate da elettroni. La carica negativa può variare soltanto in modo discontinuo, tal quale come la massa. Tuttavia la carica elettrica elementare è così piccola che in molte ricerche è non soltanto lecito, ma talvolta anche preferibile seguire a considerarla come una quantità continua. Le teorie atomiche ed elettroniche introducono dunque nella scienza quantità fisiche discontinue, che possono cioè variare soltanto saltuariamente.

Immaginiamo due lastre metalliche parallele e collocate in un recipiente dal quale sia stata estratta tutta l'aria. La carica di una delle lastre sia positiva e quella dell'altra negativa. Una carica positiva di prova, collocata fra le due lastre, verrà respinta da quella elettrizzata positivamente e attirata dall'altra, elettrizzata negativamente. Le linee di forza del campo elettrico si dirigeranno dalla lastra di carica positiva verso quella di carica negativa. Ove il corpo di prova fosse caricato negativamente, la forza agente su di esso avrebbe la direzione opposta. Se le lastre sono abbastanza grandi, le linee di forza fra l'una e l'altra saranno ovunque ugualmente dense, per cui sarà indifferente collocare il corpo di prova in questo o quel punto; la forza e perciò la densità delle linee di forza rimarranno le stesse. Degli elettroni introdotti, non importa dove, fra le due lastre si comporteranno alla stregua di gocce di pioggia o chicchi di grandine nel cam-



po gravitazionale della Terra, muovendosi parallelamente gli uni agli altri dalla lastra di carica negativa verso quella di carica positiva. Si conoscono molti dispositivi sperimentali per suscitare in un campo simile un getto di elettroni, spinti tutti nella stessa direzione. Uno dei dispositivi più semplici consiste nell'introdurre un filamento riscaldato fra le due lastre cariche. Il filamento riscaldato emette elettroni che assumono immediatamente la direzione delle linee di forza del campo esterno. Le valvole radio, che tutti conoscono, sono basate su questo principio.

Sui fasci elettronici sono stati eseguiti molti e ingegnosi esperimenti. Le modificazioni che le loro traiettorie subiscono in differenti campi elettrici e magnetici sono state attentamente studiate. Si è perfino riusciti a isolare un singolo elettrone e a determinarne la carica elementare, nonché la massa, vale a dire la resistenza inerziale che esso oppone all'azione di una forza esterna. Ci limiteremo a indicare il valore della massa di un elettrone. Essa è circa *duemila volte inferiore* alla massa di un atomo di idrogeno. Ancorché infima, la massa di un atomo d'idrogeno è assai grande in confronto alla massa di un elettrone. Dal punto di vista di una teoria coerente del campo l'intera massa, ossia l'intera energia di un elettrone, non è che l'energia del suo proprio campo, energia la cui intensità si concentra in maggior parte entro i limiti di una minutissima sfera e s'indebolisce moltissimo al di là del centro elettronico.

Abbiamo detto che per qualsiasi elemento il suo più piccolo quanto elementare è l'atomo. Questa opinione venne a lungo tenuta per vera. Ma non più oggi. La scienza ha adottato un nuovo criterio che mette in luce le deficienze di quello più antico. Non c'è forse nessun asserto della fisica meglio fondato sui fatti di quello riguardante la complessità strutturale dell'atomo. Si è potuto e dovuto constatare che l'elettrone, ossia il quanto elementare del cosiddetto fluido elettrico negativo, è anche uno dei componenti dell'atomo e cioè uno dei mattoni elementari di cui tutta la materia è costruita. Il già citato esempio di un filamento riscaldato emettente elettroni non è che uno dei tanti modi con cui queste particelle possono venir estratte dalla materia. Moltissimi fatti sperimentali, indipendenti gli uni dagli altri, dimostrano che non può sussistere dubbio sull'intima connessione fra il problema della struttura della materia e il problema dell'elettricità.



È relativamente facile estrarre da un atomo alcuni degli elettroni che concorrono alla sua composizione. Ciò si può fare con l'ausilio del calore, come nel nostro esempio del filamento riscaldata, nonché in modo diverso e cioè sottomettendo degli atomi al bombardamento di elettroni estranei.

Supponiamo che un sottile filamento metallico, portato al calor rosso, venga introdotto in un'atmosfera rarefatta d'idrogeno. Il filamento emetterà degli elettroni in tutte le direzioni. Sotto l'azione di un campo elettrico esterno potremo imprimere loro una velocità determinata. Infatti, in un simile campo un elettrone acquista velocità, tal quale come un sasso che cade nel campo gravitazionale.

Con tale dispositivo otterremo un fascio di elettroni lanciato con una velocità determinata in una determinata direzione. Oggigiorno si possono raggiungere velocità comparabili a quella della luce, sempre che gli elettroni si trovino sotto l'azione di campi elettrici molto forti. Che cosa avviene, allorché un fascio di elettroni veloci investe le molecole dell'idrogeno rarefatto? L'urto di un elettrone dotato di sufficiente velocità non solo spezza una molecola d'idrogeno nei suoi due atomi ma svelle altresì un elettrone da uno degli atomi.

È un fatto incontestabile che gli elettroni sono costituenti della materia. Ne consegue che un atomo dal quale sia stato divelto un elettrone non potrà essere elettricamente neutro. Se prima lo era, l'atomo non può più essere neutro dopo aver perso una carica elementare. Ciò che rimane di esso deve possedere una carica positiva. Inoltre, dato che la massa di un elettrone è notevolmente più piccola di quella del più leggero fra gli atomi, possiamo sicuramente concludere che la massa dell'atomo non è rappresentata da elettroni, bensì dalle sue particelle elementari restanti, che sono molto più pesanti degli elettroni. Questa parte pesante dell'atomo è il suo *nucleo*.

La fisica sperimentale moderna ha trovato dei metodi per spezzare il nucleo degli atomi, per trasmutare gli atomi di un elemento in quelli di un altro e per estrarre dal nucleo le particelle elementari che lo compongono. Il capitolo corrispondente della fisica, la cosiddetta «fisica nucleare», alla quale Rutherford ha dato un così largo contributo, è dal punto di vista sperimentale il più interessante. Ma purtroppo manchiamo tuttora di una teoria basata su

idee fondamentali semplici, la quale interpreti la gran messe di fatti della fisica nucleare. Benché il capitolo in questione sia di grande importanza per la scienza moderna, dobbiamo ometterlo per non uscire dal programma di queste pagine, che si limita alle idee generali della fisica.

## Quanti di luce

Osserviamo una parete costruita sul mare. Le onde marine ne percuotono continuamente la superficie e si ritraggono una dopo l'altra per lasciare il passo alle sopravvenienti. La parete si logora, vale a dire la sua massa si riduce e possiamo chiederci quale sia la quantità asportata entro un certo periodo di tempo, mettiamo un anno. Immaginiamo ora un processo diverso, con cui ridurre la massa della parete nella stessa misura. Spariamo contro la parete, scheggiandola nei punti colpiti dalle pallottole. La massa della parete diminuirà anche con questo metodo e nulla ci vieta di immaginare che nei due casi la riduzione possa risultare uguale. Tuttavia dall'apparenza della parete potremo sempre giudicare quale causa abbia agito, se l'azione continua delle onde o la raffica discontinua delle pallottole. Per la comprensione dei fenomeni che stiamo per descrivere sarà bene tener presente la diversità fra onde marine e raffiche di pallottole.

Abbiamo già visto che un filo metallico riscaldato emette degli elettroni. Ricorriamo ora a un altro metodo per estrarre elettroni dai metalli. Facciamo cadere su una lastra metallica luce omogenea violetta che, come sappiamo, è luce di una determinata lunghezza d'onda. La luce espelle dal metallo degli elettroni che si allontanano in gruppo, tutti con una stessa velocità ben definita. Dal punto di vista del principio della conservazione dell'energia possiamo dire: l'energia della luce si è parzialmente trasformata nell'energia cinetica degli elettroni espulsi. La tecnica sperimentale moderna ci pone in grado d'individuare questi proietti, come anche di determinarne la velocità e pertanto l'energia. L'estrazione di elettroni per mezzo di luce incidente sui metalli porta il nome di *effetto fotoelettrico*.

Ricordiamo il nostro punto di partenza: l'azione cioè di un'onda di luce omogenea di data intensità. Come esige il metodo sperimentale, modifichiamo ora il nostro dispositivo per sincerarci se ciò influisce sull'effetto osservato.

Cominciamo col variare l'intensità dell'illuminazione violetta omogenea proiettata sulla lastra metallica e notiamo se e come l'energia degli elettroni espulsi dipenda dall'intensità della luce. Proviamo a trovare la risposta col ragionamento, prima che con l'esperimento. Basandoci sulla teoria della luce siamo indotti ad arguire: Nell'effetto fotoelettrico una determinata quantità di energia raggiante si è trasformata in energia di movimento degli elettroni. Perciò illuminando il metallo con luce della stessa lunghezza d'onda, ma proveniente da una sorgente più poderosa, riscontreremo una maggior energia negli elettroni espulsi, poiché la radiazione incidente è più ricca in energia. In altre parole, la velocità degli elettroni emessi dovrebbe essere tanto maggiore quanto maggiore è l'intensità della luce. Ma l'esperimento smentisce le nostre predizioni. Ancora una volta constatiamo che le leggi della natura non sono quali noi vorremmo. Ci siamo imbattuti in un esperimento che annientando le nostre previsioni, rovina la teoria sulla quale le avevamo basate. Ciò che possiamo effettivamente accertare con l'esperimento, dal punto di vista della teoria ondulatoria della luce, è assai sorprendente. Gli elettroni emessi hanno sempre la stessa velocità, ossia la stessa energia che non varia, per quanto l'intensità della luce venga accresciuta.

Questo risultato sperimentale non si poteva prevedere in base alla teoria ondulatoria. Ancora una volta una nuova teoria sorge dal conflitto fra teoria in voga ed esperimento.

Proponiamoci di essere ingiusti verso la teoria ondulatoria della luce dimenticando i suoi grandi successi, la sua ottima spiegazione della diffrazione della luce intorno a piccolissimi ostacoli. Con l'attenzione fissa sull'effetto fotoelettrico, cerchiamone un'interpretazione teorica soddisfacente. È ovvio che non è con la teoria ondulatoria che possiamo dar ragione della completa indipendenza fra l'energia degli elettroni e l'intensità della luce che li ha espulsi dalla lastra metallica. Dobbiamo perciò ricorrere a una teoria del tutto diversa. Rammentiamoci che la teoria corpuscolare di Newton spiega molti dei fenomeni della luce. È vero che essa non rispose quan-

do si trattò di spiegare la diffrazione della luce, ma per ora prescindiamo da questo. All'epoca di Newton il concetto di energia non esisteva. Secondo lui i corpuscoli luminosi erano imponderabili ancorché possedessero carattere sostanziale e che questo fosse diverso per ogni colore. Posteriormente, quando venne creato il concetto di energia e si riconobbe che la luce era un veicolo d'energia, nessuno pensò ad applicare tali vedute alla teoria corpuscolare della luce. La teoria di Newton era morta e fino all'inizio del nostro secolo si è ritenuto che non potesse risuscitare.

Per valerci dell'idea principale di Newton dobbiamo figurarci che la luce omogenea si componga non già di corpuscoli, bensì di grani di energia, ossia di «quanti di luce» che chiameremo *fotoni*, piccolissime particelle di energia che attraversano lo spazio vuoto con la velocità della luce. La risurrezione della teoria di Newton sotto questo nuovo aspetto conduce alla *teoria quantistica* della luce. Non sono soltanto la materia e la carica elettrica a possedere struttura granulare; anche l'energia di radiazione possiede la stessa struttura, si compone cioè di quanti di luce. *Oltre ai quanti di materia e ai quanti di elettricità esistono anche i quanti di energia.*

Il concetto di quanto d'energia venne proposto per la prima volta all'inizio di questo secolo da Planck, nell'intento di spiegare fenomeni assai più complessi dell'effetto fotoelettrico. Tuttavia quest'ultimo mostra nel modo più chiaro e semplice quanto sia necessario modificare le nostre antiche vedute.

È senz'altro evidente che la teoria quantistica della luce dà ragione dell'effetto fotoelettrico. Un getto di fotoni colpisce una lastra metallica. L'interazione fra radiazione e materia consiste in tal caso in una moltitudine di singoli processi, per cui un fotone percuote un atomo divellendone un elettrone. Questi singoli processi sono tutti identici e perciò tutti gli elettroni divelti devono avere la stessa energia. È altresì chiaro che accrescere l'intensità della luce significa, nel nostro nuovo linguaggio, accrescere il numero dei proietti fotonici. In tal caso avverrà che un maggior numero di elettroni sarà espulso dalla lastra metallica, senza che l'energia di nessuno di essi si differenzi da quella degli altri. Vediamo dunque che la teoria è in perfetto accordo con l'esperienza.

Che cosa succederà se un fascio di luce omogenea di altro colore, ad esempio rosso, invece di violetto, colpisce la superficie metal-

lica? Affidiamo la risposta all'esperimento e misuriamo l'energia degli elettroni espulsi, comparandola a quella degli elettroni divelti dalla luce violetta. L'energia dell'elettrone espulso dalla luce rossa risulta inferiore all'energia dell'elettrone emesso allorché la luce è violetta. Ciò significa che l'energia dei quanti di luce differisce secondo i colori. I fotoni del colore rosso possiedono metà dell'energia posseduta dai fotoni del colore violetto. In termini più generali e rigorosi: l'energia dei quanti di luce appartenenti ai vari colori omogenei diminuisce proporzionalmente all'aumento della lunghezza d'onda dei colori stessi. È questa una differenza essenziale fra quanti di energia e quanti di elettricità. I quanti di luce differiscono per ogni lunghezza d'onda, mentre i quanti di elettricità sono tutti uguali. Ricorrendo a una delle nostre precedenti analogie potremmo comparare i quanti di luce ai più piccoli quanti o unità monetarie aventi corso nei diversi paesi.

Continuiamo a lasciare in disparte la teoria ondulatoria della luce e ammettiamo che la luce abbia struttura granulare e sia costituita da quanti luminosi, ovvero fotoni traversanti lo spazio con la velocità della luce. Secondo questa nostra nuova rappresentazione la luce è una raffica di fotoni e il fotone è il quanto di energia luminosa. Ma se abbandoniamo la teoria ondulatoria il concetto di lunghezza d'onda viene meno. Quale nuovo concetto lo sostituisce? L'energia del quanto di luce! Gli asserti enunciati in termini della teoria ondulatoria possono venir tradotti in asserti della teoria quantistica di radiazione. Per esempio:

*Terminologia della teoria ondulatoria*

Ogni luce omogenea ha una lunghezza d'onda determinata. La lunghezza d'onda dell'estremità rossa dello spettro è doppia di quella dell'estremità violetta.

*Terminologia della teoria quantistica*

Ogni luce omogenea consiste in fotoni di energia determinata. L'energia dei fotoni dell'estremità rossa dello spettro è metà di quella dell'estremità violetta.

Lo stato di fatto può riassumersi come segue: Vi sono fenomeni spiegabili con la teoria quantistica ma non con la teoria ondulatoria. L'effetto fotoelettrico non è che uno dei tanti casi del genere. Vi sono invece fenomeni spiegabili con la teoria ondulatoria ma non con la teoria dei quanti; la diffrazione della luce intorno a piccoli

ostacoli ne è un esempio tipico. Infine esistono fenomeni come la propagazione rettilinea della luce che si possono spiegare tanto con la teoria quantistica come con la teoria ondulatoria.

Ma che cos'è dunque la luce? È un'onda, oppure un getto di *fotoni*? Ricordiamo che già un'altra volta ci siamo posti una domanda analoga e cioè: la luce è forse un'onda oppure un getto di corpuscoli? Allora tutte le ragioni ci inducevano a ripudiare la teoria corpuscolare e ad accettare la teoria ondulatoria che spiegava tutti i fenomeni luminosi conosciuti. Ma ora il problema è assai più complesso. Non sembra esserci mezzo di descrivere coerentemente tutti i fenomeni luminosi in uno solo dei due linguaggi possibili. Pare che si debba ricorrere talvolta all'una e talvolta all'altra teoria e che vi siano anche casi in cui si possa ricorrere a entrambe. Ci troviamo di fronte a un nuovo genere di difficoltà. Abbiamo due opposte rappresentazioni della realtà; da sola nessuna delle due spiega totalmente i fenomeni della luce; insieme vi riescono!

Come combinare queste due rappresentazioni? Come capire questi due aspetti così diversi della luce? Non è agevole superare questa nuova difficoltà. Ancora una volta ci troviamo in presenza di un problema fondamentale.

Accettiamo per il momento la teoria quantistica della luce e tentiamo di capire, con il suo ausilio, i fatti fin qui spiegati dalla teoria ondulatoria. Così facendo daremo maggior risalto alle difficoltà che a prima vista rendono inconciliabili le due teorie.

Ricordiamo: un fascio di luce omogenea, dopo aver attraversato un forellino, forma anelli chiari e scuri (p. 115). Com'è possibile capire questo fenomeno in base alla teoria quantistica e senza tener conto della teoria ondulatoria? Un fotone è lanciato contro il forellino. Che cosa possiamo attenderci di vedere sullo schermo opposto? Evidentemente un dischetto bianco se il fotone passa e nulla se non passa. In realtà vediamo anelli chiari e scuri. Potremmo tentare di darcene ragione ammettendo che fra il contorno del forellino e il fotone si verificano interazioni che causano l'apparizione degli anelli di diffrazione. Ma purtroppo questa supposizione non spiega gran che; essa può considerarsi tutt'al più come il programma per una spiegazione futura; programma basato sulla speranza di arrivare a riconoscere la diffrazione come effetto di un'interazione fra materia e fotoni.

Ma anche questa debole speranza svanisce se ricordiamo la nostra precedente discussione intorno a un altro dispositivo sperimentale, quello cioè dei due forellini contigui. Dopo averli attraversati la luce omogenea mostra sullo schermo opposto frange chiare e scure. Come va inteso questo fenomeno dal punto di vista della teoria quantistica della luce? Potremo arguire: poiché un fotone di luce omogenea è una particella elementare della luce, non possiamo immaginarne la divisione e il passaggio attraverso entrambi i forellini e perciò il fotone deve attraversare o l'uno o l'altro dei due forellini. Ma allora l'effetto dovrebbe essere esattamente come nel primo caso e cioè anelli chiari e scuri e non già frange chiare e scure. Come è mai possibile che la presenza di un secondo forellino cambi completamente l'effetto? Dobbiamo forse ammettere che il forellino attraverso cui il fotone non passa cambia gli anelli in frange? Se il fotone si comportasse come un corpuscolo della fisica classica dovrebbe passare attraverso l'uno o l'altro forellino. Ma in tal caso i fenomeni della diffrazione diventerebbero assolutamente incomprensibili.

La scienza ci costringe a creare nuove idee, nuove teorie, il cui primo obiettivo è quello di abbattere il muro di contraddizioni che spesso blocca la via del progresso. Tutte le idee scientifiche fondamentali sono sorte dai drammatici conflitti tra la realtà e i nostri tentativi per intenderla.

Ci troviamo ora di fronte a un nuovo problema per la cui soluzione occorre fare appello a nuovi principi. Ma prima di dar conto dei tentativi fatti dalla scienza moderna per cercare di spiegare le contraddizioni fra gli aspetti quantistici e ondulatori della luce mostriamo che la stessa difficoltà sorge non soltanto per i quanti di luce ma anche per i quanti di materia.



## Spettri luminosi

Sappiamo già che la materia è costituita da poche specie di particelle e che gli elettroni furono le prime particelle elementari della materia a essere scoperte. Sappiamo per di più che gli elettroni sono anche quanti di elettricità negativa. Abbiamo inoltre visto come taluni fenomeni ci costringono ad ammettere che la luce si compone di quanti elementari luminosi che differiscono fra loro per la lunghezza d'onda. Per prima cosa dobbiamo ora discutere alcuni fenomeni fisici nei quali intervengono essenzialmente materia e radiazione.

Il Sole, com'è risaputo, emette radiazioni le quali possono venir separate in componenti da un prisma. Possiamo così ottenere lo spettro continuo del Sole fra le cui estremità tutte le lunghezze d'onda visibili sono rappresentate. Consideriamo ora un altro caso. Abbiamo già menzionato che il sodio allo stato incandescente emette luce omogenea, luce cioè di un solo colore, ovvero di una sola lunghezza d'onda. Se il sodio incandescente viene collocato davanti al prisma otteniamo soltanto una riga gialla. E in genere se un corpo raggianti viene collocato davanti al prisma la luce che esso emette si separa in componenti che costituiscono lo spettro caratteristico del corpo stesso.

La scarica elettrica in un tubo contenente del gas crea una sorgente di luce. I tubi al neon usati a scopi pubblicitari ne forniscono un esempio. Un tubo simile può venir collocato davanti allo spettroscopio, strumento che agisce come un prisma ma con molta maggior precisione e sensibilità separando la luce nei suoi componenti, vale a dire analizzandola. Se la luce che attraversa lo spettroscopio è quella del Sole avremo uno spettro continuo nel quale

tutte le lunghezze d'onda della luce visibile sono rappresentate. Ma se la sorgente luminosa è un gas attraverso il quale passa la corrente elettrica, allora lo spettro ha tutt'altro carattere. Invece della fascia multicolore e continua dello spettro solare vedremo soltanto alcune piccole strisce separate le une dalle altre e i cui vivaci colori si staccano su un fondo nero continuo. Ogni striscia, se così stretta da ridursi a una riga, corrisponde a un determinato colore, ossia, in linguaggio della teoria ondulatoria, a una determinata lunghezza d'onda. Se le righe visibili nello spettro sono ad esempio venti, ognuna di esse sarà designata da un numero esprimente la corrispondente lunghezza d'onda. Ai vapori dei diversi elementi chimici corrispondono sistemi diversi di righe e pertanto combinazioni diverse di numeri designanti le lunghezze d'onda che ne compongono lo spettro luminoso caratteristico. Non esistono due elementi il cui spettro caratteristico esibisca l'identico sistema di righe, così come non esistono due persone che abbiano le stesse impronte digitali.

La raccolta compiuta a poco a poco dai fisici dei numeri corrispondenti alle lunghezze d'onda di queste righe lasciò gradualmente intravedere l'esistenza di leggi e finalmente alle varie serie di numeri, apparentemente senza nesso, si poté sostituire una semplice formula matematica. Quanto abbiamo detto sin qui può venir tradotto in linguaggio fotonico. Le righe corrispondenti a determinate lunghezze d'onda corrispondono anche a fotoni di determinata energia. I singoli gas luminosi non emettono fotoni dotati di tutte le possibili energie, ma soltanto quelli caratteristici della sostanza di cui si compone il gas stesso. È questo un altro caso in cui la realtà limita il novero delle possibilità.

Gli atomi di un dato elemento, diciamo l'idrogeno, possono emettere soltanto fotoni di determinate energie. Soltanto l'emissione di determinati quanti di energia è lecita; l'emissione di tutti gli altri è interdetta. Consideriamo, per ragioni di semplicità, il caso di un elemento che esibisce uno spettro con una sola riga, vale a dire che emette soltanto fotoni di un'unica, ben definita energia. Ogni suo atomo sarà più ricco in energia prima della emissione che dopo. In virtù del principio della conservazione dell'energia, il *livello energetico* dell'atomo sarà più elevato prima e più basso dopo l'emissione e la differenza fra i due livelli dovrà essere uguale all'ener-

gia del fotone emesso. Cosicché il fatto che l'atomo di un dato elemento emette soltanto radiazioni di una determinata lunghezza d'onda, vale a dire soltanto fotoni di una determinata energia, potrebbe anche enunciarsi nei termini seguenti: nell'atomo di tale elemento sono consentiti soltanto due livelli energetici e l'emissione di un fotone corrisponde alla transizione dell'atomo stesso dal livello energetico superiore all'inferiore.

Di solito, negli spettri degli elementi figurano più righe. I fotoni emessi corrispondono perciò a energie diverse e non già a una sola. In altre parole, dobbiamo ritenere che più livelli energetici siano permessi in un atomo e che l'emissione di un fotone corrisponda alla transizione dell'atomo da un livello energetico più alto a uno più basso. Tuttavia l'essenziale è che non tutti i livelli energetici sono leciti, poiché non tutte le lunghezze d'onda, ovvero non tutte le possibili energie fotoniche, figurano nello spettro di un elemento. Invece di dire che quelle date righe caratterizzanti gli spettri dei vari atomi corrispondono a onde di determinate lunghezze, potremo anche dire che le righe segnano i diversi livelli energetici riscontrabili nei vari atomi e che l'emissione di quanti di luce è associata alla caduta dell'atomo da un livello energetico a un altro. Di regola i livelli energetici non sono continui, bensì discontinui. Di nuovo constatiamo che la realtà limita le possibilità.

Fu Bohr a mostrare per primo perché soltanto alcune righe a esclusione di altre appaiono negli spettri. La sua teoria, enunciata venticinque anni fa, offre una rappresentazione dell'atomo in base alla quale si possono – per lo meno nei casi più semplici – calcolare gli spettri degli elementi, cosicché numeri apparentemente senza reciproco legame e significato acquistano al lume della teoria un nesso significativo.

La teoria di Bohr costituisce una tappa intermedia per giungere a un'altra teoria più generale e profonda, la cosiddetta *meccanica ondulatoria* o *quantistica* i cui concetti fondamentali ci prefiggiamo di caratterizzare in queste nostre ultime pagine. Prima di farlo, dobbiamo però accennare a un altro risultato teorico e sperimentale d'indole più speciale.

Lo spettro visibile comincia con una data lunghezza d'onda per il colore violetto e finisce con una data lunghezza d'onda per il colore rosso. Detto altrimenti nello spettro visibile le energie dei foto-

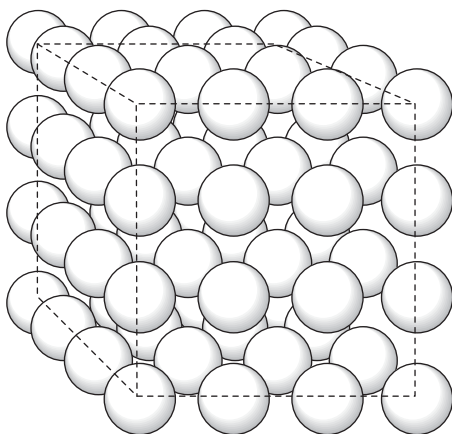
ni non possono mai oltrepassare i limiti energetici corrispondenti ai colori violetto e rosso. Questa limitazione è naturalmente soltanto una proprietà dell'occhio umano. Se la differenza d'energia di alcuni dei livelli energetici è sufficientemente grande, allora potrà verificarsi l'emissione di un fotone ultravioletto cui corrisponde una riga al di là dello spettro visibile. Questa riga non può venir percepita a occhio nudo, per cui bisogna ricorrere all'ausilio di una lastra fotografica.

I raggi X consistono anch'essi in fotoni, ma di energia molto superiore a quella della luce visibile; in altri termini, le loro lunghezze d'onda sono molto più corte, migliaia di volte più corte di quelle della luce visibile.

Ma è possibile determinare sperimentalmente lunghezze d'onda tanto corte? È già abbastanza difficile riuscire a farlo per la luce ordinaria. Come sappiamo occorrono ostacoli e forellini piccolissimi. Ma, per quanto vicini e piccoli, due forellini suscettibili di produrre effetti di diffrazione della luce ordinaria sono ancora migliaia di volte troppo distanti e troppo grandi per rivelare la diffrazione dei raggi X.

Come fare allora, per misurare la lunghezza d'onda di questi raggi? La natura stessa ci viene in aiuto.

Un cristallo è un agglomerato di atomi disposti a distanze estremamente brevi gli uni dagli altri, secondo uno schema perfetta-



mente regolare. Il disegno mostra il più semplice modello strutturale di cristallo. Invece di forellini esso presenta ostacoli estremamente piccoli, costituiti dagli atomi dell'elemento disposti in ordine assolutamente regolare e vicinissimi gli uni agli altri. Come risulta dalla teoria delle strutture cristalline gli spazi fra gli atomi sono talmente esigui che ci si può aspettare producano l'effetto di diffrangere i raggi X. E infatti l'esperimento fornisce la prova che le onde dei raggi X vengono diffratte da questi piccolissimi ostacoli, così strettamente impacchettati e disposti secondo il regolare ordinamento tridimensionale che si riscontra nei cristalli.

Supponiamo che un fascio di raggi X colpisca un cristallo e che dopo averlo attraversato raggiunga una lastra fotografica. Questa esibirà allora una tipica figura di diffrazione. Esistono vari metodi per lo studio degli spettri e delle figure di diffrazione dei raggi X, che permettono di trarne dati sulle lunghezze d'onda dei raggi stessi. Ciò che abbiamo detto qui in poche parole riempirebbe dei volumi se dovessimo entrare in tutti i dettagli teorici e sperimentali. Nella tavola III diamo soltanto una delle tante figure di diffrazione ottenibili con i vari procedimenti in uso. Anche qui vediamo gli anelli scuri e chiari così caratteristici della teoria ondulatoria. Nel centro risalta la macchia chiara del raggio non diffratto, macchia che sarebbe la sola a vedersi qualora il cristallo non fosse stato interposto fra i raggi X e la lastra fotografica. Da fotografie del genere possiamo calcolare le lunghezze d'onda degli spettri dei raggi X e inversamente, quando la lunghezza d'onda sia nota, se ne possono trarre conclusioni sulla struttura del cristallo.

## Le onde della materia

Come possiamo interpretare il fatto che soltanto alcune caratteristiche lunghezze d'onda appaiono negli spettri degli elementi?

In fisica è avvenuto più volte che progressi essenziali potessero realizzarsi seguendo coerentemente un'analogia fra fenomeni in apparenza estranei. Nel corso di queste pagine abbiamo più volte constatato come idee create e svolte in un certo ramo della scienza siano poi state applicate con successo in un altro. Non pochi esempi del genere ci vengono forniti dagli sviluppi tanto dell'interpretazione meccanicistica, quanto del concetto di campo. L'associazione di problemi già risolti con altri ancora insoluti può talvolta gettare nuova luce sulle difficoltà in cui c'imbattiamo. Ma se è facile trovare analogie superficiali che in realtà mancano di significato, non lo è invece scoprire qualche comune tratto fondamentale, nascosto dietro apparenze esterne contrastanti, e costruire su questa base una nuova teoria che s'imponga. Questo sì che è veramente lavoro creativo! Lo sviluppo della cosiddetta *meccanica ondulatoria*, creata da de Broglie e da Schrödinger circa 15 anni fa, è l'esempio tipico dell'affermarsi di una brillante teoria imperniata su una profonda e fortunata analogia.

Prenderemo le mosse da un esperimento classico che non ha nulla a che fare con la fisica moderna. Impugniamo l'estremità di un lunghissimo tubo di gomma, oppure di un lunghissimo saltaleone,

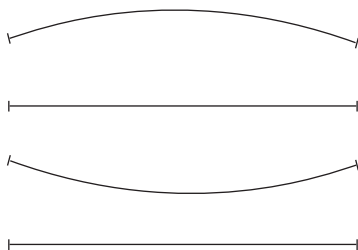


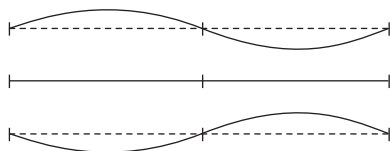
e cominciamo a muoverla ritmicamente su e giù, a imprimerle cioè un movimento oscillatorio. Questa oscillazione, come già abbiamo potuto constatare, crea un'onda che si propaga lungo il tubo con una certa velocità. Se immaginiamo che la lunghezza del tubo sia infinita, le singole onde, una volta create, proseguiranno il loro infinito viaggio senza interferenza.

Consideriamo un altro caso. Fissiamo le due estremità di un tubo di gomma, o anche di una corda di violino. Che cosa avviene ora, se un'onda è creata a una delle estremità del tubo o della corda? L'onda inizia il suo percorso come nell'esempio precedente ma viene subito riflessa dall'altra estremità fissa. Abbiamo così due onde, una creata dall'oscillazione, l'altra dalla riflessione, le quali camminano in senso opposto e interferiscono l'una con l'altra. Non è difficile determinare l'interferenza delle due onde e identificare l'onda risultante dalla loro sovrapposizione, la cosiddetta *onda stazionaria*. I due termini «onda» e «stazionaria» sembrano contraddirsi l'un l'altro; tuttavia la loro combinazione è giustificata dal risultato della sovrapposizione delle due onde.

L'esempio più semplice di un'onda stazionaria è il moto di una corda fissa alle due estremità, un moto di su e giù, come mostra il disegno. Questo moto è il risultato della sovrapposizione, l'una sull'altra, delle due onde camminanti in direzioni opposte. La caratteristica di questo moto è che soltanto i due punti terminali sono a riposo. Essi sono denominati *nodi*. L'onda staziona, per così dire, fra i due nodi, tutti gli altri punti della corda raggiungono simultaneamente i massimi o i minimi della loro deviazione.

Questa è la varietà più semplice di onda stazionaria. Ve ne sono altre. Così ad esempio un'onda stazionaria può avere tre nodi, uno





a ciascuna delle due estremità e uno al centro. In tal caso tre punti sono costantemente a riposo. Uno sguardo al disegno qui sopra mostra che la lunghezza d'onda si riduce alla metà di quella con due nodi. Similmente, onde stazionarie possono avere quattro, cinque o più nodi. In ogni caso la lunghezza d'onda dipenderà dal numero dei nodi. Questo numero non può essere che intero e non può cambiare che saltuariamente. Una cifra come 3,576 riferita al numero dei nodi di un'onda stazionaria non ha senso. Ne consegue che anche la lunghezza d'onda può variare soltanto in modo discontinuo. In questo classico problema ritroviamo i caratteri familiari della teoria quantistica.



L'onda stazionaria prodotta da un violinista è assai più complicata, essendo una mescolanza di molte onde, con 2, 3, 4 e 5 e più nodi e pertanto una mescolanza di lunghezze d'onda diverse. La fisica è in grado di analizzare tali mescolanze e di individuare le onde stazionarie semplici che le compongono. Ricorrendo alla terminologia usata precedentemente potremo dire che la nostra corda oscillante ha un suo spettro, allo stesso modo di un elemento chimico, che emette radiazioni. E come per lo spettro di un elemento, così anche per una corda oscillante soltanto alcune lunghezze d'onda sono consentite, tutte le altre essendo interdette.

Abbiamo dunque scoperto qualche somiglianza fra la corda oscillante e l'elemento chimico emettente radiazioni. Per quanto strana possa parere l'analogia, proviamo a trarne ulteriori conclusioni e a spingere più oltre il confronto che abbiamo ritenuto di poter azzar-



dare. Gli atomi di ogni elemento sono composti di particelle elementari, le più pesanti delle quali costituiscono il nucleo e le più leggere gli elettroni. Un tale sistema di particelle si comporta come un piccolo strumento acustico, nel quale si producano onde stazionarie.

L'onda stazionaria è il risultato dell'interferenza fra due o, generalmente, più onde in moto. Se nella nostra analogia c'è del vero, un dispositivo ancor più semplice dell'atomo dovrebbe corrispondere a un'onda che si propaga. Qual è questo più semplice dispositivo? Nel nostro mondo materiale non può esservi nulla di più semplice di una particella elementare come l'elettrone, sul quale non agisca nessuna forza, vale a dire un elettrone a riposo o in moto uniforme. Potremmo perciò azzardarci ad aggiungere un altro anello alla catena delle nostre analogie: elettrone in moto uniforme → onde di determinata lunghezza. Questa fu la nuova e coraggiosa idea di de Broglie.

Abbiamo visto poco fa che esistono fenomeni nei quali la luce manifesta carattere ondulatorio e altri nei quali rivela natura corpuscolare. Dopo esserci abituati all'idea che la luce è un'onda, ci siamo accorti con gran sorpresa che in alcune circostanze – ad esempio nell'effetto fotoelettrico – essa si comporta come un getto di fotoni. Ora ci troviamo di fronte al caso opposto. C'eravamo assuefatti a considerare gli elettroni come corpuscoli e cioè quanti elementari di elettricità e di materia, dotati di carica e di massa ben definita, e ora dovremmo ammettere che essi possono comportarsi come onde. Ma se in quest'idea di de Broglie c'è del vero, deve verificarsi qualche fenomeno nel quale la materia riveli il proprio carattere ondulatorio. Sulle prime questa conclusione, raggiunta seguendo l'analogia acustica, sembra strana e incomprensibile. Come può un corpuscolo in moto avere qualcosa in comune con un'onda? Non è la prima volta che in fisica abbiamo dovuto fronteggiare simili difficoltà. Ci siamo imbattuti in un problema analogo nel dominio dei fenomeni luminosi.

Nella costruzione delle teorie fisiche sono le idee fondamentali che contano. I libri di fisica sono pieni di complicate formule matematiche. Ma il pensiero e le idee e non le formule stanno all'origine di ogni teoria fisica. È soltanto in seguito che le idee devono prendere la veste matematica di una teoria quantitativa, ai fini del controllo sperimentale. Ne abbiamo un chiaro esempio nel problema di

cui ci stiamo occupando. La congettura principale è che in taluni fenomeni l'elettrone in moto uniforme si comporterà come un'onda. Supponiamo che un elettrone o, meglio, un getto di elettroni tutti dotati della stessa velocità siano in moto uniforme. La massa, la carica e la velocità di ogni singolo elettrone sono note. Volendo associare in qualche modo il concetto di onda a uno o più elettroni in moto dobbiamo anzitutto chiederci: quale può essere la lunghezza d'onda? È questo un quesito d'ordine quantitativo e per rispondere occorre formulare una teoria prevalentemente quantitativa. La cosa non è affatto difficile. La semplicità matematica del lavoro di de Broglie per rispondere al quesito è davvero sorprendente e contrasta con la tecnica matematica assai più sottile e complicata di altre teorie fisiche preesistenti. Ma se la manipolazione matematica del problema relativo alle onde della materia è semplice ed elementare, in cambio le idee fondamentali sono profonde e di vasta portata.

Precedentemente, nel caso delle onde luminose e dei fotoni, abbiamo visto che ogni affermazione enunciata nel linguaggio delle onde può venir tradotta nel linguaggio dei fotoni o corpuscoli luminosi. Altrettanto vale per le onde elettroniche. Conosciamo già il linguaggio corpuscolare adeguato a elettroni in moto uniforme. Ogni asserto enunciato in questo linguaggio può venir tradotto in linguaggio ondulatorio. Due indizi suggerirono le regole di traduzione. L'analogia sia fra onde luminose ed elettroniche, sia fra fotoni ed elettroni è uno degli indizi. Esso induce a ricorrere allo stesso metodo di traduzione per la materia come per la luce. La teoria della relatività speciale fornì il secondo indizio. E cioè: le leggi naturali devono essere invarianti rispetto alla trasformazione di Lorentz e non già rispetto alla trasformazione classica. Questi due indizi conducono alla determinazione della lunghezza d'onda corrispondente a un elettrone in moto. In base alla teoria è facile calcolare che un elettrone dotato della velocità di circa 16 000 chilometri al secondo possiede una lunghezza d'onda appartenente alla stessa regione delle lunghezze d'onda dei raggi X. Di qui possiamo trarre la conclusione ulteriore che qualora sia possibile verificare il carattere ondulatorio della materia l'esperimento dovrà svolgersi in modo analogo come per i raggi X.

Immaginiamo un fascio di elettroni in moto uniforme, di velocità determinata, ovvero per usare la terminologia ondulatoria un'onda

*elettronica omogenea* che colpisce una sottilissima lamella di cristallo, adoperata come reticolo di diffrazione. Nel cristallo le distanze fra gli ostacoli diffrangenti sono talmente piccole che si può produrre la diffrazione dei raggi X. Ci si dovrà attendere lo stesso effetto per onde elettroniche aventi lunghezze d'onda dello stesso ordine. Una lastra fotografica dovrà mostrare la diffrazione delle onde che attraversano il sottile strato cristallino. E infatti l'esperimento ci conferma gli incontestabili meriti della teoria facendoci assistere al fenomeno della diffrazione delle onde elettroniche. La somiglianza fra la diffrazione di un'onda elettronica e la diffrazione di un raggio X è assai pronunciata, come può constatarsi comparando le immagini della tavola III. Sappiamo già che tali fotografie ci mettono in grado di determinare la lunghezza d'onda dei raggi X. Ciò vale anche per le onde elettroniche. La figura prodotta dalla diffrazione fornisce la lunghezza di un'onda della materia e la perfetta concordanza quantitativa fra teoria e esperimento giustifica pienamente la catena dei nostri ragionamenti. Questi risultati non fanno che ampliare e approfondire le difficoltà già incontrate. Possiamo rendercene conto con un esempio simile a quello di cui ci siamo serviti per l'onda luminosa. Un elettrone lanciato contro un forellino diffrangerà allo stesso modo di un'onda luminosa. Anelli chiari e scuri appariranno sulla lastra fotografica. Potrebbe darsi che questo fenomeno sia spiegabile con l'interazione fra l'elettrone e l'orlo del forellino, ancorché tale spiegazione non appaia troppo promettente. Ma che succede allorché i forellini sono due? Invece degli anelli appaiono le frange! Com'è possibile che la presenza del secondo forellino modifichi radicalmente l'effetto? L'elettrone è indivisibile e perciò dovrebbe verosimilmente attraversare soltanto uno dei due forellini. Come potrebbe un elettrone che attraversa un forellino sapere che un altro forellino è stato aperto lì in prossimità?

Abbiamo già avuto occasione di domandarci: che cos'è la luce? È un getto di corpuscoli o un'onda? Ora dobbiamo chiederci: che cos'è la materia, che cos'è un elettrone? È una particella o un'onda? L'elettrone si comporta come una particella allorché si muove in un campo elettrico o magnetico esterno; si comporta invece come un'onda allorché è diffratto da un cristallo. Con i quanti di materia urtiamo dunque contro la stessa difficoltà nella quale inceppia-

mo con i quanti di luce. Una delle questioni basilari sollevate dai recenti progressi scientifici è quella del come conciliare i due opposti criteri di materia e di onda. Si tratta di una di quelle difficoltà fondamentali che una volta riconosciute devono, alla lunga, condurre a nuovi progressi scientifici. La fisica moderna ha tentato di risolvere il problema; spetta al futuro decidere se la soluzione suggerita è durevole o soltanto provvisoria.

## Onde di probabilità

Ricordiamo che in base alle leggi della meccanica classica, ove si conoscano posizione e velocità di un punto materiale e inoltre le forze agenti su di esso, è possibile predirne il percorso futuro. In meccanica classica l'affermazione «in un dato istante il punto materiale possiede posizione e velocità determinate» ha un significato preciso. Se questa affermazione venisse a perdere il proprio significato cadrebbe anche il ragionamento esposto a p. 38 sulla predizione del futuro percorso del punto stesso.

Al principio del XIX secolo gli scienziati tendevano a ridurre tutta la fisica a forze semplici agenti su particelle materiali dotate, a ogni istante, di posizioni e velocità determinate. Ricordiamo come abbiamo rappresentato il moto, discutendo di meccanica all'inizio del nostro viaggio nel regno dei problemi fisici. Su una traiettoria data abbiamo segnato dei punti corrispondenti alle esatte posizioni del corpo in taluni dati istanti, dopo di che abbiamo tracciato dei vettori tangenziali indicanti direzione e grandezza della velocità. Ciò è altrettanto semplice quanto convincente. Non è però possibile valerci dello stesso procedimento per i quanti elementari di materia o elettroni, né per i quanti di energia o fotoni. Non possiamo rappresentare il percorso di un fotone o di un elettrone allo stesso modo col quale raffiguriamo il moto in fisica classica. L'esperimento con i due forellini lo prova chiaramente. Tanto l'elettrone quanto il fotone sembrano passare attraverso entrambi i forellini. È dunque impossibile spiegare tale effetto rappresentando il percorso di un elettrone o di un fotone con l'antico metodo classico.

Non possiamo, beninteso, dubitare della realtà di azioni elementari quali il passaggio di elettroni o di fotoni attraverso forellini. Né

possiamo porre in dubbio l'esistenza di quanti elementari di materia e di energia. Ma è certo che le corrispondenti leggi elementari non possono venire formulate specificando posizioni e velocità dei quanti, in qualsiasi istante, allo stesso modo e con la stessa semplicità come in meccanica classica.

Tentiamo dunque un'altra via. Immaginiamo di ripetere molte volte di seguito lo stesso procedimento elementare. Uno dopo l'altro degli elettroni vengono lanciati in direzione dei forellini. La parola «elettrone» è qui usata per fissare le idee: è ovvio che quanto diciamo per gli elettroni vale anche per i fotoni. La ripetizione dell'esperimento si verifica sempre nelle stesse condizioni, tutti gli elettroni hanno la stessa velocità e sono tutti diretti verso i forellini. Si tratta, beninteso, di un esperimento ideale che nulla ci vieta d'immaginare, ma che non possiamo eseguire in pratica poiché non è possibile lanciare singoli elettroni o fotoni a volontà, come se si trattasse di sparare fucilate.

Comunque, il risultato di tale processo a ripetizione non può essere nuovamente che quello di anelli scuri e chiari con un solo forellino o di frange scure e chiare con due forellini. C'è però una differenza essenziale. Con un singolo elettrone l'apparizione di frange era incomprensibile; riesce invece più facile intenderla con l'esperimento a ripetizione. In tal caso possiamo infatti dire: le frange chiare appaiono dove arrivano molti elettroni; esse si scuriscono dove gli elettroni giungono in minor numero; una macchia nera significa che lì gli elettroni non sono arrivati. Beninteso, non possiamo supporre che tutti gli elettroni passino attraverso un solo forellino. Se ciò fosse, non si noterebbe alcuna differenza coprendo o no l'altro forellino. Sappiamo invece che coprendo il secondo forellino l'effetto risulta diverso. E siccome una particella elementare è indivisibile non possiamo ammettere che passi attraverso entrambi i forellini. Il fatto di aver ripetuto molte volte lo stesso esperimento ci apre una nuova via d'uscita. Potremo infatti ammettere che alcuni degli elettroni passano attraverso il primo forellino e altri attraverso il secondo. Non sappiamo perché i singoli elettroni scelgono un forellino piuttosto che l'altro, ma dai nostri esperimenti a ripetizione deve risultare che entrambi i forellini intervengono nella trasmissione degli elettroni dalla sorgente fino alla lastra fotografica. Il divario fra le immagini anulari e le frangiate diventa senz'al-

tro comprensibile se, noncuranti del comportamento delle singole particelle, ci limitiamo ad affermare ciò che avviene con una moltitudine di elettroni, allorché il lancio viene ripetuto molte volte di seguito. La discussione intorno all'esperimento a ripetizione ha dunque fatto nascere una nuova idea: quella di una moltitudine composta d'individui, il comportamento dei quali è imprevedibile. Non potremo, è vero, preannunciare il comportamento di un singolo elettrone, ma potremo predire che se i forellini sono due il risultato finale sarà l'apparizione sulla lastra fotografica di frange chiare e scure.

Lasciamo ora per un istante la fisica dei quanti.

Rammentiamo che in fisica classica la conoscenza della posizione e della velocità di un punto materiale in un dato istante è sufficiente per poter predire il suo percorso futuro. Rammentiamo altresì che l'interpretazione meccanicistica venne estesa alla teoria cinetica della materia e che dai ragionamenti basati su tale teoria emerse un nuovo criterio. Per meglio intendere la discussione in corso converrà sviscerare tale criterio a fondo.

Prendiamo un vaso contenente del gas. Se volessimo descrivere il movimento di ogni particella gassosa dovremmo cominciare col determinare gli stati iniziali, vale a dire posizione e velocità di tutte le particelle. Ma, anche ammesso che ciò fosse possibile, i calcoli richiederebbero più tempo di un'intera vita umana, causa l'enorme numero di particelle da prendere in considerazione. Se poi volessimo ricorrere ai noti metodi della meccanica classica per calcolare le posizioni finali di tutte le particelle le difficoltà diventerebbero insormontabili. Teoricamente sarebbe dunque possibile valersi dello stesso metodo seguito per i moti planetari, ma in pratica ciò non condurrebbe a nulla. Ci vediamo così nella necessità di ricorrere al *metodo statistico*. Questo metodo ci dispensa bensì dalla conoscenza esatta degli stati iniziali, ma ciò che ci fa conoscere del sistema in un dato istante è incompleto, cosicché non possiamo precisarne né il passato né il futuro. La sorte delle singole particelle di gas non ci riguarda più. Il nostro problema assume un altro carattere. Così, ad esempio, dobbiamo astenerci dal chiedere: Qual è la velocità di ogni particella in quest'istante? Per contro ci è lecito domandare: Quante sono le particelle aventi velocità comprese fra trecento e trecentotrenta metri al secondo? Dobbiamo insomma disinteressar-

ci degli individui, cercando invece di determinare valori medi caratterizzanti l'intero aggregato. Ragionamenti di carattere statistico hanno senso soltanto allorché il sistema considerato si compone di un grande numero d'individui.

Applicando il metodo statistico non possiamo predire l'esatto comportamento di un individuo facente parte di una moltitudine. Possiamo soltanto predire la probabilità che esso si comporti in un certo modo. Se le nostre statistiche ci dicono che un terzo delle particelle gassose possiede velocità comprese fra 300 e 330 metri al secondo, ciò significa che ripetendo le nostre osservazioni su molte particelle otterremo realmente tale media, altrimenti detto, che la probabilità di trovare una particella la cui velocità stia entro i suddetti limiti è uguale a un terzo.

Similmente conoscere il coefficiente di natalità di una grande collettività non significa sapere se una certa famiglia è allietata dalla nascita di un figlio. Significa conoscere risultati statistici, rispetto ai quali la personalità di coloro che hanno contribuito a formarli è senza importanza.

Osservando le targhe di molte automobili scopriremo presto che un terzo dei loro numeri è divisibile per tre. Ma non potremo predire se l'auto che passerà nel prossimo istante avrà questa caratteristica. Le leggi statistiche possono applicarsi unicamente a grandi aggregati e non ai loro singoli componenti.

Possiamo ora tornare al nostro problema dei quanti.

Le leggi della fisica quantistica sono di carattere statistico. Ciò significa che esse non concernono un singolo sistema, bensì un aggregato di sistemi identici. Tali leggi non possono venire comprovate con misure effettuate su un solo individuo, ma unicamente con una serie di misure ripetute.

La disintegrazione radioattiva è uno dei tanti fatti per i quali la fisica quantistica tenta di formulare leggi governanti la trasmutazione spontanea di un elemento in un altro. Si è ad esempio potuto stabilire che in 1600 anni la metà di un grammo di radio sarà disintegrata, mentre l'altra metà rimarrà inalterata. Possiamo predire approssimativamente quanti atomi si disintegreranno durante la prossima mezz'ora, ma nessuna teoria ci soccorre per spiegare perché proprio questi tali atomi sono condannati. Il destino di un atomo non dipende dalla sua età. Non esiste traccia di legge che



governi il suo comportamento individuale. Le sole leggi che possiamo formulare sono leggi d'indole statistica; leggi governanti vasti aggregati di atomi.

Ricorriamo a un altro esempio: il gas luminoso di un elemento qualsiasi collocato davanti a uno spettroscopio produce uno spettro composto di alcune righe, corrispondenti a determinate lunghezze d'onda. L'apparizione di una serie discontinua di determinate lunghezze d'onda è una caratteristica di quei fenomeni atomici che ci rivelano l'esistenza di quanti elementari. Ma la questione presenta anche un altro aspetto. Alcune delle righe spettrali sono molto nitide, altre lo sono meno. Una riga nitida significa che i fotoni di questa lunghezza d'onda vengono emessi in numero relativamente grande, una riga debole significa che i fotoni di questa altra lunghezza d'onda vengono emessi in numero relativamente piccolo. Ancora una volta le indicazioni fornite dalla teoria sono di carattere meramente statistico. Ogni riga segnala la transizione da un livello energetico superiore a uno inferiore. La teoria ci fa conoscere soltanto la probabilità di ognuna di queste possibili transizioni, ma non ci fa sapere nulla circa l'effettiva transizione per un singolo atomo. La teoria dà ottimi risultati sempre che si tratti di fenomeni implicanti vasti aggregati e non soltanto singoli individui.

Sembrerebbe che la nuova fisica quantistica somigli non poco alla teoria cinetica della materia, poiché entrambe hanno carattere statistico ed entrambe si riferiscono a grandi aggregati. Eppure non è così! Ed è della massima importanza che di tale analogia s'intendano non soltanto le somiglianze, ma anche le discrepanze. La somiglianza fra teoria cinetica della materia e fisica quantistica risiede soprattutto nel loro carattere statistico. Ma in che consiste il divario?

Ove desiderassimo sapere quanti uomini e quante donne di età superiore ai vent'anni abitano in una città, dovremmo far riempire a ogni cittadino una scheda con le indicazioni: «maschio», «femmina» ed «età». Sempre che tutte le risposte corrispondano al vero basterà contarle e suddividerle per ottenere un risultato di natura statistica. I singoli nomi e i rispettivi indirizzi figuranti sulla scheda non hanno importanza. Tuttavia le nostre conclusioni statistiche sono desunte dalla conoscenza di casi individuali. Similmente nella teoria cinetica della materia abbiamo leggi statistiche governan-

ti l'aggregato, alle quali si perviene in base a leggi di carattere individuale.

Ma nella fisica quantistica la situazione è completamente diversa. *Qui le leggi statistiche sono date immediatamente, prescindendo dalla conoscenza di leggi individuali.* Con l'esempio di un fotone o di un elettrone in presenza di due forellini, abbiamo infatti visto che il possibile moto nello spazio e nel tempo di particelle elementari non può venire rappresentato con i metodi della fisica classica. *La fisica quantistica prescinde dunque da leggi individuali riferibili a particelle elementari e formula direttamente leggi statistiche governanti gli aggregati.* Non è possibile basarsi sulla fisica quantistica per descrivere posizioni e velocità di una particella elementare o per predirne il percorso, come avviene in fisica classica. La fisica dei quanti tratta unicamente di aggregati e le sue leggi valgono per le moltitudini e non per gli individui.

È la dura necessità e non propensione alla speculazione, né ricerca della novità che ci obbliga a modificare i vecchi criteri classici. Abbiamo illustrato la difficoltà di applicare tali criteri con un solo esempio, quello dei fenomeni di diffrazione; ma potremmo citarne molti altri e altrettanto convincenti. Mutamenti d'opinione ci vengono continuamente imposti dai nostri tentativi per comprendere la realtà, ed è soltanto il futuro che potrà decidere se abbiamo imboccato l'unica possibile via di uscita o se non avremmo potuto trarci d'impaccio con una soluzione migliore.

La rinuncia alla rappresentazione di casi individuali quali avvenimenti obiettivi nello spazio e nel tempo e l'introduzione di leggi di natura statistica, cui siamo stati costretti, costituiscono le principali caratteristiche della fisica dei quanti.

Precedentemente, all'introdurre nuove realtà fisiche, quali il campo elettromagnetico e il campo gravitazionale, abbiamo provato a indicare sommariamente i tratti caratteristici delle equazioni che sono servite a formulare matematicamente quelle nuove idee. Altrettanto faremo ora nei riguardi della fisica quantistica, riferendoci molto brevemente ai lavori di Bohr, de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Dirac e Born.

Consideriamo il caso di un singolo elettrone. Esso può trovarsi sotto l'influenza di un qualsiasi campo elettromagnetico, oppure essere libero da ogni influenza esterna. L'elettrone potrà ad esem-

pio muoversi nel campo di un nucleo atomico, oppure diffrangere attraverso un cristallo. La fisica quantistica insegna come formulare le equazioni matematiche di tali problemi.

Abbiamo già avuto occasione di constatare l'analogia fra una corda oscillante, la membrana di un tamburo, uno strumento a fiato o qualsiasi altro strumento acustico da un lato e un atomo raggianti dall'altro lato. Esiste anche qualche somiglianza fra le equazioni matematiche governanti il problema acustico e quelle governanti la fisica quantistica. Ma l'interpretazione fisica delle grandezze determinate nei due casi è del tutto diversa. Malgrado alcune somiglianze formali delle rispettive equazioni, le grandezze fisiche caratterizzanti la corda oscillante e l'atomo raggianti hanno significato assai diverso. Nel caso della corda si tratta di conoscere la deviazione dalla posizione normale di un qualsiasi suo punto in un istante qualsiasi. Conoscendo la forma della corda in un dato istante sappiamo tutto ciò che occorre. La deviazione dalla normale in un istante ulteriore può venir calcolata mediante l'equazione matematica della corda oscillante. Il fatto che a ogni punto della corda corrisponde una determinata deviazione dalla posizione normale viene espresso più rigorosamente nei termini seguenti: in ogni istante la deviazione dal valore normale è *funzione* delle coordinate della corda. Tutti i punti della corda costituiscono un continuo unidimensionale e la deviazione è una funzione definita in tale continuo unidimensionale e calcolabile mediante l'equazione della corda oscillante.

Analogamente, nel caso di un elettrone, viene determinata una certa funzione per un qualsiasi punto dello spazio in un qualsiasi istante. Chiameremo questa funzione *onda di probabilità*. Nella nostra analogia l'onda di probabilità corrisponde alla deviazione dalla posizione normale nel problema acustico. Ma mentre nel caso della corda oscillante la deviazione in un dato istante è funzione di un continuo unidimensionale, l'onda di probabilità in un dato istante è invece funzione di un continuo tridimensionale. L'onda di probabilità costituisce, per così dire, il catalogo delle nostre cognizioni sul sistema quantistico allo studio e ci pone in grado di rispondere a tutti i ragionevoli quesiti d'indole statistica relativi al sistema stesso. Essa non ci dà posizione e velocità dell'elettrone, in qualsiasi istante, poiché in fisica quantistica il porre tale quesito non ha

senso. In cambio essa ci indica la probabilità di trovare l'elettrone in un dato luogo, ci indica cioè dove sia più facile trovare un elettrone. Il risultato si riferisce non già a una sola ma a una serie numerosa di misurazioni. Le equazioni della fisica quantistica determinano l'onda di probabilità in modo analogo sia a quello con cui le equazioni di Maxwell determinano il campo elettromagnetico, sia a quello con cui le equazioni della relatività generale determinano il campo gravitazionale. Detto altrimenti, anche le leggi della fisica quantistica sono strutturali. Tuttavia il significato dei concetti fisici definiti dalle equazioni della fisica quantistica è molto più astratto che non nel caso dei campi elettromagnetici e gravitazionali, non fornendoci detti concetti che i mezzi matematici per risolvere questi d'indole statistica.

Fin qui abbiamo considerato un singolo elettrone in un campo esterno qualsiasi. Ma se in luogo di un solo elettrone, ossia della minima carica elettrica possibile, si considera una carica di qualche entità, composta di miliardi di elettroni, si può fare anche a meno dell'intera teoria dei quanti e trattare il problema secondo l'antica fisica prequantistica. In caso di correnti in un filo, di conduttori carichi e di onde elettromagnetiche possiamo sempre valerci della nostra antica e semplice fisica contenuta nelle equazioni di Maxwell. Ma non possiamo far ciò quando si tratta dell'effetto fotoelettrico, dell'intensità delle linee spettrali, della radioattività, della diffrazione delle onde elettroniche e di non pochi altri fenomeni palesanti il carattere quantistico della materia e dell'energia. In tal caso dobbiamo, per così dire, salire un piano più su. Mentre in fisica classica parlavamo di posizioni e di velocità di un corpuscolo, ora invece dobbiamo considerare onde di probabilità in un continuo tridimensionale a questo problema di un solo corpuscolo.

La fisica quantistica fornisce proprie norme per trattare un dato problema purché si sia precedentemente appreso a trattare il problema analogo con i metodi della fisica classica.

Per una singola particella elementare, elettrone o fotone, abbiamo onde di probabilità in un continuo tridimensionale caratterizzante il comportamento statistico del sistema, sempre che gli esperimenti vengano ripetuti più volte. Ma qual è la situazione nel caso non più di una sola ma di due particelle interagenti, due elettroni ad esempio, oppure un elettrone e un fotone, o anche un elettrone

e un nucleo? In ragione delle reciproche interazioni non è lecito considerare le particelle separatamente e raffigurare ognuna di esse mediante un'onda di probabilità su tre dimensioni. Non è tuttavia difficile intuire come in fisica quantistica si possa descrivere un sistema composto di due particelle interagenti. Scendiamo di un piano e torniamo per un momento alla fisica classica. Qui la posizione di due punti materiali nello spazio è caratterizzata a ogni istante da sei numeri, tre per ognuno dei punti. L'insieme di tutte le possibili posizioni dei due punti materiali costituisce un continuo a sei dimensioni e non più a tre dimensioni come nel caso di un solo punto. Se ora risaliamo di un piano e torniamo alla fisica quantistica avremo delle onde di probabilità in un continuo a sei dimensioni e non più in un continuo a tre dimensioni come quando si tratta di una sola particella. Similmente per tre o quattro o più particelle, le onde di probabilità saranno funzioni in un continuo a nove o dodici e più dimensioni.

È pertanto evidente che le onde di probabilità sono ancora più astratte del campo elettromagnetico e del campo gravitazionale che esistono e si propagano nel nostro spazio tridimensionale. Il continuo pluridimensionale costituisce lo sfondo per le onde di probabilità e soltanto nel caso di una singola particella il numero delle dimensioni è il medesimo come per lo spazio fisico. L'unico significato fisico dell'onda di probabilità è che essa ci pone in grado di rispondere a quesiti ragionevoli, tanto nel caso di molte particelle, come nel caso di una sola. Così, se per un singolo elettrone possiamo chiedere qual è la probabilità di trovarlo in un dato luogo, per due particelle potremo porre il quesito nei termini seguenti: qual è la probabilità di trovare in un dato istante le due particelle in due luoghi determinati?

Il primo passo che ci ha allontanato dalla fisica classica, lo abbiamo fatto rinunciando alle descrizioni di casi individuali quali eventi oggettivi nello spazio e nel tempo. Siamo stati così costretti ad applicare il metodo statistico offertoci dalle onde di probabilità. Ma una volta presa questa via ci vediamo obbligati ad andare ancora più oltre con le astrazioni. Dobbiamo cioè ricorrere a onde di probabilità pluridimensionali ogni qual volta più particelle sono oggetto del problema da risolvere.

Chiamiamo, per essere brevi, classica tutta la fisica eccetto quella dei quanti. Queste due fisiche differiscono radicalmente l'una dall'altra. La fisica classica mira alla rappresentazione di oggetti esistenti nello spazio e alla formulazione delle leggi governanti le vicende degli oggetti stessi nel tempo. Ma di fronte ai fenomeni palesanti la duplice natura corpuscolare e ondulatoria della materia e della radiazione, e di fronte al carattere manifestamente statistico di eventi elementari, quali la disintegrazione radioattiva, la diffrazione, l'emissione di linee spettrali e molti altri ancora, ci è gioco forza rinunciare ai suddetti criteri. La fisica quantistica non mira alla rappresentazione di singoli oggetti nello spazio e delle rispettive variazioni nel tempo. Nella fisica quantistica non è lecito asserire: «Questo oggetto è fatto così e così e possiede tali e tali proprietà». Le affermazioni lecite sono d'altra indole e cioè: «Ci sono queste e queste probabilità che il singolo oggetto sia fatto così e così e che possieda tali e tali proprietà». *Le leggi della fisica quantistica non governano le vicende nel tempo di oggetti singoli, esse governano le variazioni della probabilità nel tempo.* Soltanto questa fondamentale innovazione introdotta nella fisica dalla teoria dei quanti rese possibile un'adeguata spiegazione del carattere manifestamente discontinuo e statistico degli eventi nel dominio dei fenomeni con i quali i quanti elementari di materia e di radiazione palesano la propria esistenza.

Ma sorgono ancora altri e più difficili problemi che attendono tuttora una soluzione definitiva. Ci limiteremo a menzionarne soltanto alcuni. La scienza è un libro nel quale la parola «fine» non è né sarà mai scritta. Ogni importante progresso fa nascere nuovi quesiti. Alla lunga ogni sviluppo conduce a nuove e più profonde difficoltà.

Sappiamo già che nei casi semplici in cui si tratta di una o più particelle possiamo salire dalla rappresentazione classica alla quantistica, vale a dire dal piano della rappresentazione oggettiva degli eventi nello spazio e nel tempo al piano delle onde di probabilità. Ma come possiamo rappresentare le azioni reciproche fra quanti elementari di materia e «campo»? Se per la rappresentazione quantistica di dieci particelle occorre un'onda di probabilità a trenta dimensioni, per la rappresentazione quantistica di un campo occorrerà un'onda di probabilità a numero infinito di dimensioni. La tran-

sizione dal concetto classico di campo al corrispondente problema delle onde di probabilità costituisce per la fisica quantistica un passo assai difficile. In tal caso salire di un piano non è cosa agevole e tutti i tentativi fatti finora per risolvere il problema non hanno condotto a risultati soddisfacenti. Ma c'è ancora un altro problema fondamentale. In tutti i nostri ragionamenti sul passaggio dalla fisica classica alla fisica dei quanti ci siamo valse dell'antica rappresentazione prerelativistica, secondo cui spazio e tempo vengono considerati separatamente. Ma allorché proviamo a partire dalla rappresentazione classica, suggerita dalla teoria della relatività (continuo spazio-temporale a quattro dimensioni), la nostra scalata al problema quantistico si complica di molto. È questo uno dei problemi affrontati dalla fisica moderna, ma tuttora lontani da una soluzione completa e soddisfacente. Ci scontriamo infine con un'ulteriore difficoltà nel tentare di costruire una fisica coerente per le particelle pesanti che costituiscono i nuclei atomici. Malgrado la grande raccolta di dati sperimentali e i molti tentativi volti a far luce sul problema nucleare, siamo ancora allo scuro su alcune delle questioni fondamentali in questo dominio.

La fisica classica spiegava indubbiamente una grande varietà di fatti, raggiungendo quasi sempre un ottimo accordo fra teoria e osservazione. La recente fisica dei quanti ci allontana sempre più dall'interpretazione meccanicistica e una ritirata sulle antiche posizioni sembra più che mai improbabile. D'altro canto non vi è dubbio che la fisica quantistica deve ancora basarsi su due concetti: materia e campo. In questo senso essa è una teoria dualistica e non fa avanzare di un sol passo il vecchio problema di ridurre tutto al concetto di campo.

Quale sarà lo sviluppo futuro? Seguirà l'indirizzo della fisica quantistica, o è forse più probabile che nuove idee rivoluzionarie si introdurranno nella fisica? La via del progresso farà un'altra svolta repentina, com'è spesso avvenuto in passato?

Durante questi ultimi anni tutte le difficoltà della fisica quantistica si sono andate concentrando intorno ad alcuni pochi problemi. I fisici ne attendono con impazienza la soluzione. Ma non ci è dato prevedere come, quando e dove si produrrà la chiarificazione di tali difficoltà.

## Fisica e realtà

Quali sono le conclusioni generali che possono trarsi dallo sviluppo della fisica così come l'abbiamo delineato in un sommario schizozo, riassumendo soltanto le idee più fondamentali?

La scienza non è una raccolta di leggi, un catalogo di fatti senza nesso. È una creazione dell'intelletto umano, con le sue libere invenzioni d'idee e di concetti. Le teorie fisiche tentano di costruire una rappresentazione della realtà e di determinarne i legami con il vasto mondo delle impressioni sensibili. Pertanto le nostre costruzioni mentali si giustificano soltanto se le teorie costituiscono realmente un legame di tal fatta e secondo come lo costituiscono.

Abbiamo assistito alla creazione di nuove realtà, per virtù dei progressi della fisica. Ma la catena di tali creazioni prende inizio molto prima del sorgere della fisica. Uno dei concetti primordiali è quello di oggetto. I concetti di albero, di cavallo, di oggetto in genere sono creazioni ricavate dall'esperienza, ancorché le impressioni dalle quali derivano siano assai primitive in confronto dei fenomeni fisici. Anche un gatto che stuzzica un sorcio crea col pensiero la propria realtà primitiva. Il fatto che il gatto reagisce allo stesso modo ogni qual volta s'imbatte in un sorcio, prova che esso si forma concetti e teorie che lo guidano attraverso il proprio mondo d'impressioni sensibili.

«Tre alberi» è cosa differente da «due alberi». «Due alberi» è cosa differente da «due pietre». I concetti dei puri numeri 2, 3, 4... affrancati dagli oggetti coi quali sorsero sono creazioni dell'intelletto che pensa; creazioni intese a raffigurare la realtà del nostro mondo.



La sensazione psicologica e soggettiva del tempo ci mette in grado di ordinare le nostre impressioni e di affermare che un evento ne precede un altro. Ma il collegare ogni istante di tempo a un numero, mediante l'uso d'un orologio, il considerare il tempo come un continuo a una dimensione è già un'invenzione. Sono del pari invenzioni i concetti di geometria euclidea e non euclidea, nonché il nostro spazio, inteso come un continuo tridimensionale.

La fisica ebbe realmente principio con le invenzioni di massa, di forza e di sistema inerziale. Tali concetti sono tutte libere invenzioni. Essi condussero alla formulazione del punto di vista meccanicistico. Per il fisico dell'inizio del XIX secolo, la realtà del nostro mondo esteriore consisteva in particelle e in forze semplici agenti sulle stesse e dipendenti soltanto dalla distanza. Egli cercò di conservare quanto più a lungo possibile la convinzione di riuscire a spiegare tutti gli eventi della natura mediante questi fondamentali concetti della realtà. Ma prima le difficoltà inerenti alla deviazione dell'ago magnetico, poi quelle connesse alla struttura dell'etere e altre ancora condussero alla creazione di una realtà più sottile, con l'importante invenzione del campo elettromagnetico. Occorreva una coraggiosa immaginazione scientifica per riconoscere appieno che l'essenziale per l'ordinamento e la comprensione degli eventi può essere non già il comportamento dei corpi, bensì il comportamento di qualcosa interposto fra di essi, vale a dire il campo.

Sviluppi posteriori demolirono i vecchi concetti, creandone dei nuovi. Il tempo assoluto e il sistema di coordinate inerziali vennero soppiantati dalla teoria della relatività. Lo sfondo di tutti gli eventi non fu più costituito da due continui, quello unidimensionale del tempo e quello tridimensionale dello spazio, bensì dal continuo spazio-temporale a quattro dimensioni (altra libera invenzione) con nuove proprietà di trasformazione. Il sistema di coordinate inerziale divenne superfluo. Si riconobbe che qualsiasi sistema di coordinate è ugualmente appropriato per la descrizione degli eventi naturali.

La teoria dei quanti creò a sua volta nuovi ed essenziali aspetti della nostra realtà. La discontinuità rimpiazzò la continuità. Alle leggi governanti gli individui subentrarono leggi di probabilità.

La realtà creata dalla fisica moderna è invero assai lontana dalla realtà dei primi giorni. Ma gli scopi di ogni teoria fisica rimangono sempre gli stessi.

Con l'aiuto delle teorie fisiche cerchiamo di aprirci un varco attraverso il groviglio dei fatti osservati, di ordinare e d'intendere il mondo delle nostre impressioni sensibili. Aneliamo a che i fatti osservati discendano logicamente dalla nostra concezione della realtà. Senza la convinzione che con le nostre costruzioni teoriche è possibile raggiungere la realtà, senza convinzione nell'intima armonia del nostro mondo, non potrebbe esserci scienza. Questa convinzione è, e sempre sarà, il motivo essenziale della ricerca scientifica. In tutti i nostri sforzi, in ogni drammatico contrasto fra vecchie e nuove interpretazioni riconosciamo l'eterno anelito d'intendere, nonché l'irremovibile convinzione nell'armonia del nostro mondo, convinzione ognora più rafforzata dai crescenti ostacoli che si oppongono alla comprensione.

## Riassumiamo

La grande varietà di fatti nel dominio dei fenomeni atomici ci obbliga a escogitare ancora nuovi concetti fisici. La materia possiede struttura granulare, si compone di particelle elementari: i quanti elementari di materia. Pertanto la carica elettrica possiede una struttura granulare e – ciò che più conta dal punto di vista della teoria quantistica – così pure l'energia. I fotoni sono i quanti di energia di cui si compone la luce.

La luce è un'onda o un getto di fotoni? Un fascio di elettroni è un getto di particelle elementari o un'onda? Questi quesiti basilari sono imposti alla fisica dai risultati sperimentali. Nel tentare di rispondervi dobbiamo rinunciare alla descrizione dei fatti atomici mediante raffigurazioni nello spazio e nel tempo; dobbiamo cioè allontanarci ancor più dall'antica interpretazione meccanicistica. La fisica dei quanti formula leggi che governano non già gli individui ma le moltitudini. Non sono più le proprietà ma le probabilità a essere oggetto della descrizione. Le leggi formulate non ci dischiudono più il futuro dei sistemi presi in esame. Sono leggi che governano le variazioni delle probabilità nel tempo; leggi relative a grandi aggregati d'individui.



## *Indice dei nomi*

- Aristotele, 20, 38
- Black, Joseph, 48, 57
- Bohr, Niels, 249, 264
- Born, Max, 264
- Broglie, Louis-Victor de, 252, 255-56, 264
- Brown, Robert, 68
- Copernico, Niccolò, 151, 199-200
- Coulomb, Charles-Augustin, 81, 87, 91, 133, 148, 222
- Democrito, 62
- Dirac, Paul, 264
- Euclide, 213, 218
- Faraday, Michael, 125, 136, 139, 141-44, 146
- Fizeau, Armand-Hippolyte-Louis, 95-96
- Fresnel, Augustin-Jean, 114
- Galilei, Galileo, 19-22, 26, 32, 35, 38, 45, 48, 62-63, 94-95, 150, 155, 165, 191
- Galvani, Luigi, 88
- Heisenberg, Werner, 264
- Helmholtz, Hermann von, 63-64
- Hertz, Heinrich Rudolph, 125, 146
- Huyghens, Christiaan, 109, 117
- Joule, James Prescott, 57-59
- Leibniz, Gottfried Wilhelm, 35
- Lorentz, Hendrik Antoon, 179-83, 196, 198, 205, 221, 226, 256
- Maxwell, James Clerk, 125, 141, 143-49, 178-79, 222, 226-27, 229, 266
- Mayer, Julius Robert von, 57
- Michelson, Albert Abraham, 96, 167
- Morley, Edward Williams, 167
- Newton, Isaac, 19, 21-23, 35, 39-41, 71, 81, 87, 91, 101-02, 109, 114, 127, 133, 141, 144, 158, 199, 205, 210, 221-25, 229, 242-43
- Oersted, Hans Christian, 90-91, 134, 139, 141, 143-44, 146
- Planck, Max, 243
- Rømer, Ole Christensen, 95-96
- Rowland, Henry Augustus, 91-92, 127, 134-135, 143
- Rumford, Benjamin Thompson, conte di, 52, 57
- Rutherford of Nelson, Ernest, 239
- Schrödinger, Erwin, 252, 264
- Thomson, Joseph John, 237
- Tolomeo, Claudio, 200
- Volta, Alessandro, 88-89
- Young, Thomas, 114



## *Indice delle cose*

- Accelerazione, 24  
Ago magnetico e corrente, 90  
  e carica in moto, 91-92  
Arcobaleno, 101  
Atomo raggiante, 185-86  
  d'idrogeno, massa dell', 235  
  livelli energetici dell', 248  
  nucleo dell', 239  
Calore, 47, 49  
  come energia, 56  
  come moto, 65  
  come sostanza, 50  
  equivalente meccanico del, 59  
  flusso del, 49  
  latente, 50  
  peso del, 187  
  quantità di, 49  
  specifico, 49  
Calorico, 50  
Campo, 126  
  concetto di, 130  
  elettrico, 134  
  elettromagnetico, 143  
  elettrostatico, 134  
  gravitazionale, 126  
  leggi del, 143  
  magnetico, 130  
  magnetostatico, 134  
  rappresentazione del, 127  
  struttura del, 141, 143  
Capacità calorifica, 49  
Carica elettrica, 81  
  elementare dell'elettrone, 238  
  in moto, 91  
  oscillante, 134  
Colori, 101  
Conduttori, 78  
Continuità, 233  
Conservazione dell'energia, 60  
  della massa, 60  
  della massa-energia, 187  
Continuo pluridimensionale, 190  
  quadridimensionale, 196  
  spazio-temporale, 196  
  tridimensionale, 191  
  unidimensionale, 189  
Coordinata di un punto, 156  
Coordinate, sistema di (SC), 152  
Corda oscillante, 253  
Corrente elettrica, 88, 235  
  indotta, 130  
Cristalli, struttura dei, 250-51  
Diffrazione:  
  dei fotoni, 245  
  dell'onda elettronica, 257  
  dei raggi luminosi, 115  
  dei raggi X, 250-51  
Dipolo:  
  elettrico, 85  
  magnetico, 85  
  elementare, 86  
Discontinuità, 233  
Disintegrazione radioattiva, 185-86  
*Due nuove scienze*, 22, 94  
Effetto fotoelettrico, 241  
Elettricità:  
  negativa, 236  
  positiva, 77, 236

- Elettrone:  
   diffrazione dell', 257  
   massa dell', 238  
   nell'atomo, 238  
 Elettroscopio, 75  
 Elettrostatica, 79  
 Energia, 56  
   calorifica, 50  
   cinetica, 55  
   come sostanza, 56  
   conservazione dell', 56  
   del moto molecolare, 65  
   di radiazione, 242  
   massa dell', 187  
   meccanica, 55  
   potenziale, 55  
   quanti di, 243  
 Equazioni:  
   della gravitazione, 39-40  
   di Maxwell, 134-35  
   quantistiche, 264  
 Esperimento:  
   cruciale, 51  
   di Coulomb, 81  
   di Faraday, 136  
   di Fizeau, 95-96  
   di Galileo, 45  
   di Hertz, 146  
   di Joule, 57-59  
   di Michelson-Morley, 167  
   di Newton, 101  
   di Oersted, 90-91  
   di Rowland, 91-92  
   di Rumford, 52  
 Etere, 119-20  
  
 Fisica nucleare, 239  
 Fluidi elettrici, 77  
   direzione dei, 83  
 Forza di attrazione:  
   concetto di, 23  
   di gravità, 39-40  
   elettrica, 81  
   e materia, 62  
   linea di, 126  
   magnetica, 84  
   terrestre, 37  
 Fotoni, 243  
   ultravioletti, 250  
  
 Gravitazione, 41  
   legge della, universale, 41  
   legge relativistica della, 222  
  
 Imponderabili, sostanze, 87  
 Inerzia, legge d', 21  
 Invarianti, 157  
 Isolanti, 78  
  
 Leggi di:  
   di Coulomb, 81  
   di Maxwell, 141  
   Newton, 39-40  
   statistiche, 261  
     della fisica quantistica, 264  
     della teoria cinetica della materia, 260-261  
 Livello energetico, 248-49  
 Luce:  
   bianca, 101  
   come sostanza, 97  
   corpuscoli di, 99, 102  
   dell'atomo di sodio, 103  
   diffrazione della, 115  
   dispersione della, 102  
   incurvamento della, in un campo gravitazionale, 209  
   omogenea, 103  
   propagazione rettilinea della, 97  
   riflessione della, 99  
   rifrazione della, 98-99  
   teoria corpuscolare della, 98-99  
   teoria elettromagnetica della, 147  
   teoria ondulatoria della, 109  
   teoria quantistica della, 243  
   velocità della, 95-96  
  
 Magneti, 84  
 Massa, 43  
   di riposo, 184  
   di un atomo d'idrogeno, 235  
   di un elettrone, 238  
   di una molecola d'idrogeno, 70  
   inerte, 44  
   pesante, 44  
 Materia:  
   e campo, 226  
   ed energia, 187  
   radioattiva, 185



- sorgente di forza, 62
- costituzione della, 185
- teoria cinetica della, 65
- Meccanica:
  - ondulatoria, 249
  - quantistica, 249
- Mercurio, traiettoria di, 224
- Molecole, 65
  - numero delle, in un grammo d'idrogeno, 70
- Moto:
  - assoluto, 164
  - costante del, 55
  - curvilineo, 31
  - definizione aristotelica del, 20
  - leggi del, 31
  - rappresentazione dinamica del, 194
  - rappresentazione statica del, 194
  - relativo, 164
  - rettilineo uniforme, 21
- Movimento browniano, 68
- Nodi, 253
- Nucleo atomico, 239
- Onda, 104
  - della materia, 255
  - di probabilità, 265
  - elettromagnetica, 145
  - elettronica, 255
  - longitudinale, 106
  - luminosa, 109
  - lunghezza d', 105
    - della luce rossa, 116
    - della luce violetta, 116
  - omogenea, 256-57
  - piana, 108
  - sferica, 105
  - stazionaria, 253
  - trasversale, 106
  - velocità dell', 105
    - elettromagnetica, 146
- Orologi sincronizzati, 173
- Pianeti, moto dei, 39, 120
- Pila voltaica, 88
- Potenziale elettrico, 81
- Principia* (Newton), 23
- Probabilità, onda di, 265
- Proprietà metriche, 219
- Quanti elementari, 234
  - di elettricità, 237
  - di energia, 243
  - di luce, 243
  - di materia, 235
- Radio, 186
- Radioattività, 185
- Raggi X, diffrazione dei, 250-51
- Relatività:
  - principio galileiano di, 154
  - teoria della, generale, 198
  - teoria della, speciale, 170
- Riferimento, sistemi di, 152
- Righe spettrali, 248
- SC (sistema di coordinate), 152
- Simultaneità, 171-72
- Solenoidi, 130
- Spettro:
  - dei gas, 247
  - dei raggi X, 251
  - del sodio, 103, 247
  - solare, 102
  - visibile, 102
- Spettroscopio, 247
- Spazio:
  - euclideo o tridimensionale, 191
  - quadrimensionale, 196
- Stelle doppie, 163
- Temperatura, 47
- Tempo assoluto, 195
- Termometro, 48
- Terra come magnete, 87
- Tormalina, cristalli di, 118
- Trasformazione:
  - classica o galileiana, 158
  - di Lorentz, 179
- Uranio, 185
- Vettori, 27
  - della forza, 30
  - della variazione di velocità, 30, 34
  - della velocità, 27